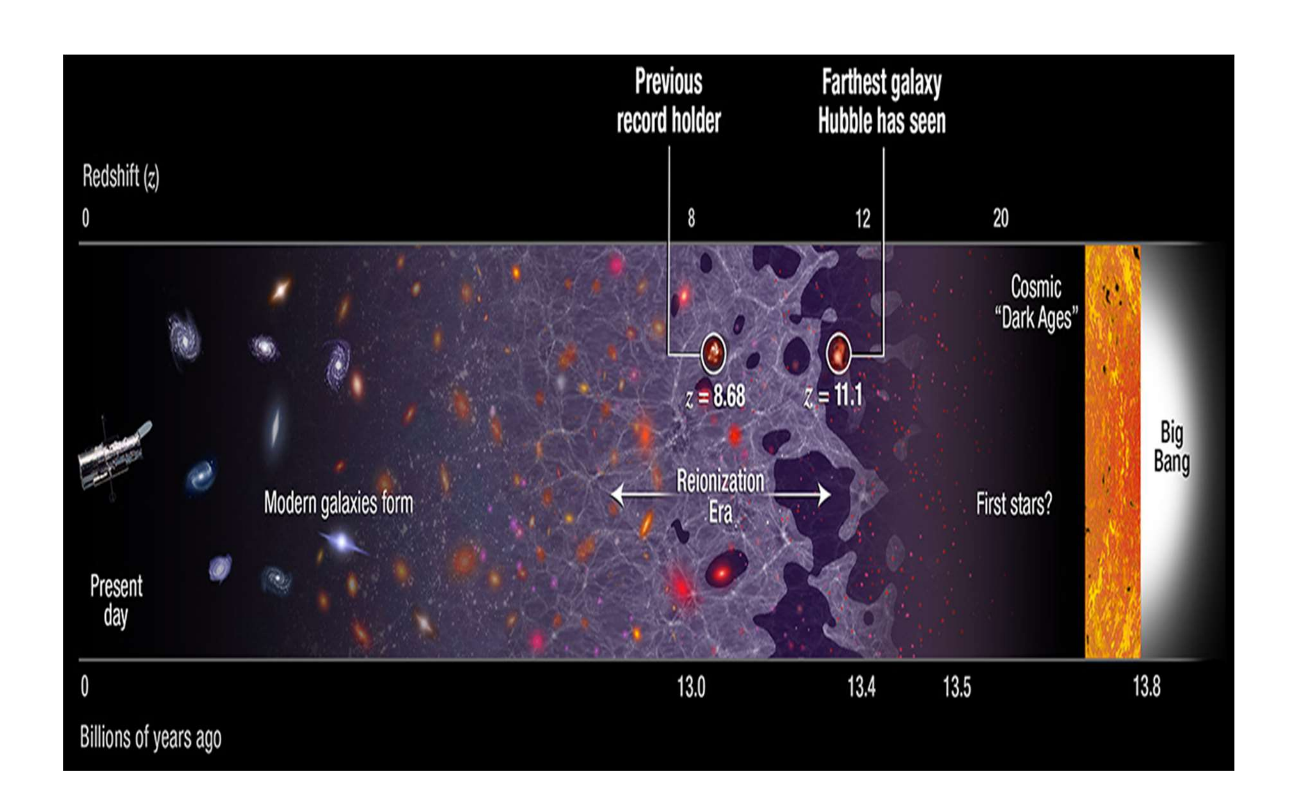
Biografía del Universo



Jaime Reguart Pelegrí

Biografía del Universo

Marzo 2018

A partir de la serie “*Biografía del Universo*” editada en el blog “*El Cedazo*”.

(https://eltamiz.com/elcedazo/biografia-del-universo/)

Imagen de portada: NASA, ESA, P. Oesch y B. Robertson (University of California, Santa Cruz), y A. Feild (STScI), dominio público.

(https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/image2i1607bw.jpg)

El único coste será el exclusivo de edición. El autor.

ÍNDICE

Biografía del Universo

"*Toda la materia, más toda la gravedad en el universo observable, es igual a cero. Por eso el Universo pudo surgir de la nada, porque es, básicamente, nada*". ***Alan Guth, padre de la expansión inflacionaria.***

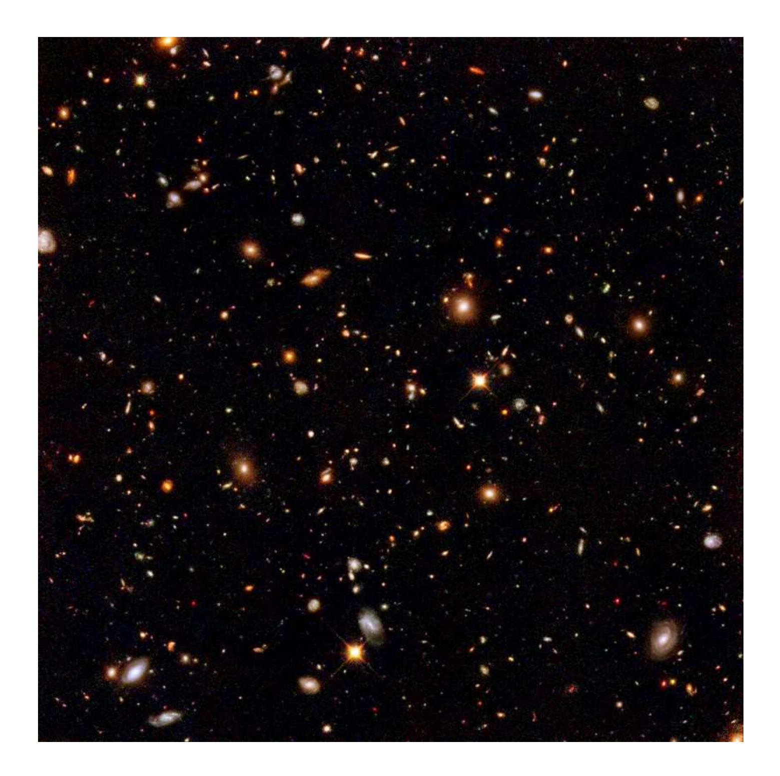


Imagen del campo profundo del Universo observable tomada por el telescopio Hubble Space, en el que se llegan a ver miríadas de galaxias, y eso que con la tecnología actual solamente llegamos a contemplar el 10% del total de galaxias (Imagen NASA y European Space Agency, dominio público)

El día que esto escribo es primero de enero de 2017. Año Nuevo, Vida Nueva, se dice por todo el Orbe. Un buen momento para sentarme y compartir una nueva aventura científico-literaria con todo aquel que la quiere seguir. Los que me conocéis ya sabéis mi tendencia hacia las biografías de las cosas que he publicado en el blog "*El Cedazo*". En este blog ya se ha publicado una larga, acerca de la aventura de la vida terráquea: "*La Biografía de la Vida*". Más tarde

otra biografía particular, podríamos decir una rama de la anterior, acerca de la historia que hizo que unos animalillos indefensos se convirtieran en unos feroces competidores en el vértice de la pirámide, gracias a que una serie de carambolas azarosas y coyunturales los colocó allí. Una aventura que la hemos contado como "*Biografía de lo Humano*", esto último con mayúscula. En este libro propongo el que nos adentremos en la intrincada selva del escenario en donde se llevaron a cabo las dos anteriores obras teatrales: **el Universo**, también éste con mayúsculas.

Así que hablemos ya de la "**Biografía del Universo**". Mi nueva propuesta.

Como en las otras ocasiones citadas, este libro es el resultado de múltiples lecturas dispersas, cazadas a vuelapluma, inicialmente desconexas y con el único propósito de satisfacer mi curiosidad. Como siempre, mil notas y apuntes que satisfacían también mis aficiones escritoras. Son años de descubrir y decantar. Aunque ahora, con la experiencia que me dieron el vivir las otras series, el enfoque último lo tenía en la cabeza: **[1]** aprender de una historia que debía ser hilada y coherente, **[2]** divulgarla a través de una plataforma cuyo útil principio fundacional dice así como que "*un buen entendimiento necesita de la ayuda de una buena simplificación*", lo que permitía a mi formación ingenieril ponerse a tiro de la obra que me proponía, y **[3]** esperar la lluvia enriquecedora de los comentarios de los lectores, absolutamente necesarios. Y así surgió otro de mis libros de viajes, que se fue viendo a lo largo de la serie homónima del blog "*El Cedazo*".

La idea es muy simple: Partiendo del inicio que suponemos para el Universo, el Big Bang, llegar a la comprensión de cómo surgieron, y siguen en ello, las estructuras del Universo que observamos a nuestro alrededor. Éste puede ser un posible sucinto guión:

- El momento cero
- El hipotético escenario del Universo en las edades de Planck, cuando la gran unificación de las fuerzas fundamentales
- El hecho de la inicial inflación exponencial del espacio-tiempo
- Cómo surge la radiación y la materia

- La sopa del plasma materia-antimateria de la época electrodébil
- Las partículas elementales en el plasma quark-gluón
- Higgs haciendo de las suyas
- Aparecen los hadrones… entre otros, los protones y los neutrones.
- Los hadrones se constituyen en asambleas, formando algunos núcleos de unos pocos elementos químicos
- La música del Big Bang y su reflejo en la primera foto de familia gracias a la radiación de fondo
- La materia entra en faena una vez que la pegajosa radiación decide liberarse
- De la oscuridad a la luz gracias a las primeras estrellas y galaxias
- La compactación y ordenamiento de la materia
- La estructura final del Universo

Bueno… algo más o menos así es mi propósito. Como veis, una historia apasionante que da el necesario soporte a la particular crónica de nuestro sistema solar y la vida sobre la Tierra contada en una serie del blog "*El Cedazo*", "*La Biografía de la Vida*", y recopilada en un libro del mismo título.

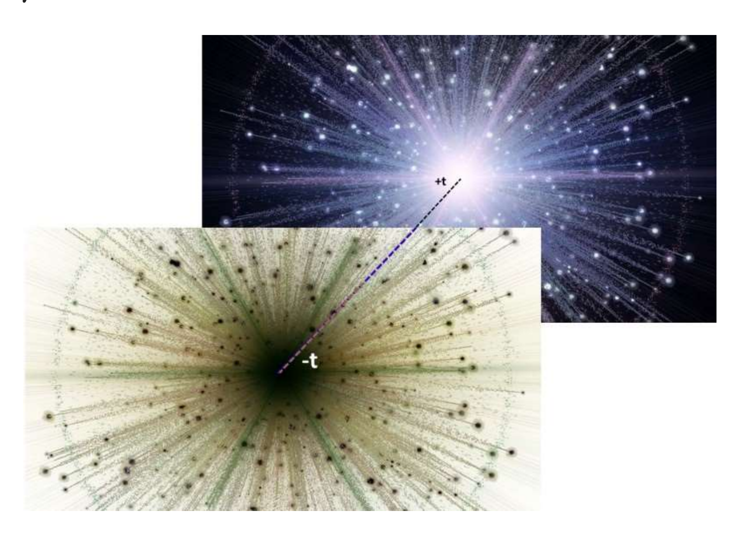
Antes de acabar este breve prefacio, quiero reconocer a los que me han enseñado lo que en este libro expongo, a mis maestros, una vez más a Pedro Gómez-Esteban, *alma mater* del blog "*El Tamiz*", a Enrique F. Borja con su fantástico blog "*Cuentos Cuánticos*", a los grandes del blog "Naukas", a los fenómenos del blog "*NeoFronteras*", a Matt Strassler por su blog "*Of Particular Significance"* y a alguno más que se quedan en el tintero. Y, por supuesto, y sin dudarlo, a tantos divulgadores científicos del mundo anglosajón… ¡qué buenos son, los condenados!, comenzando por el añorado Carl Sagan que sembró la semilla, para seguir por Steven Weinberg, George Gamow, Leon Lederman, Richard Feynman, Stephen Hawking, Brian Green, Michio Kaku, Lawrence Krauss, John Gribbin, Bill Bryson, Paul Davies… y unos cuantos más.

Cumplido con el obligado protocolo… podemos empezar.

01: Introducción a una historia real

Tiempo 0/∞

… "***Desde mi posición en*** $[\alpha_{1110}\,\beta_5\,\pi_{47}\ \ldots\ \Omega^t\Lambda^{tx}]$ *soy capaz de percibir el colapso. Cómo definirme. Una inteligencia en el mundo de las cuerdas, dimensión 11. Notario fehaciente de todos los sucesos. Incluso los del pequeño Cosmos de cuatro dimensiones próximo a nacer. Como tantas otras veces, comienzo a experimentar el ligero desvaído en el que me sumiré durante el paso de la… singularidad. No me preocupa. Soy un experto en este tipo de experiencias, por otro lado muy normales en los espacios de Kalabi-Yau donde habito. A veces, alguno de estos organismos multidimensionales juega a ser niño y alardea de crear florestas con unos pocos de sus múltiples brazos. Intuyo que es el momento. Como el cloroformo antes de las anestesias, huele a infinito eterno… antes de la tiniebla ¡Nos vemos en el más allá!"* …



Alegoría muy imaginativa de la transición al Big Bang, un viaje a través de la singularidad del origen del tiempo, ***"Desde mi posición en*** $[\alpha_{1110}\,\beta_5\,\pi_{47}\ \ldots\ \Omega^t\Lambda^{tx}]$***…"*** *en un hipotético espacio en negativo abocado hacia un "gemelo" espacio de luz: nuestro Universo (Imagen modificada a partir de otra de la red, fair use)*

Así pudo comenzar la historia que vamos a relatar a lo largo de los capítulos de este libro sobre la Biografía del Universo. Imaginario.

Al otro lado de nuestra frontera temporal. Antes de la creación de nuestro Universo.

He optado por una fábula, pues ciertamente nadie en este mundo, el de las *x,y,z* y *t* sensibles, sabe de dónde viene nuestro Cosmos ni cómo fue su primer instante. Y si alguien dice que tiene la clave, miente como un bellaco. ¿Nació en aquel incógnito momento el entramado del espacio-tiempo que conocemos?, ¿o fue simplemente una extensión 0/∞ de otro ya existente? O como en el cuento imaginado, ¿resultó ser un rebote de algo anterior?, ¿o surgió ex-novo del vacío? Aunque… ¿qué es el vacío? Podemos imaginar, inventar, conjeturar… pero no sabemos nada de nuestro momento t=0 -¿y si no hubo t=0?-. Aunque menos aún que menos sabemos de t<0.

El animal racional que surge como una etapa en la historia que nos trae y que ha sido fijada por las condiciones físicas de nuestro Universo, el hombre, siempre ha sido muy curioso. Ha querido ver con el cuerpo y la razón todo lo que hay más allá de su propio sentimiento como individuo. Con los sentidos llegó hasta donde estos llegaban. Poco para la curiosidad y mucho, lo suficiente, para la supervivencia. Llegado el momento en que fue consciente de ello tuvo que idear milagros para lo razonable. Pero la razón es terca y pertinaz. Curiosa y potente. Comenzó a extender los brazos ejecutores de las antenas sensoriales. A la cabeza de ellos, la vista.

Ideó instrumentos para ver en lo alto. Midió cada vez mejor el tiempo. Supo adentrar su pupila hasta el mundo de lo más pequeño. Y no se rindió por no llegar más lejos. Donde sus sentidos no abarcaban… idea la gran herramienta que los prolongó casi hasta el infinito: la abstracción matemática y el cálculo con el que jugaba.

Así, una gran fila de visionarios, extensa desde todos los tiempos, pero que iniciamos con Nicolás Copérnico, que fue quien puso al mundo en su lugar. Galileo, Kepler, Newton, Laplace, Darwin, Maxwell, Einstein, Planck, Schrödinger, Heisenberg, Hubble, Feynman, Guth, Hawking… y sé que me dejo un millar de ellos en el tintero. Una saga que participa en la tramoya de nuestra historia. Con sus neuronas privilegiadas y su voluntad irreductible.

En el legado de la humanidad, la teoría y la matemática. Los instrumentos y la experiencia. Las herramientas con las que imaginamos el nacimiento y devenir posterior de nuestro Universo.

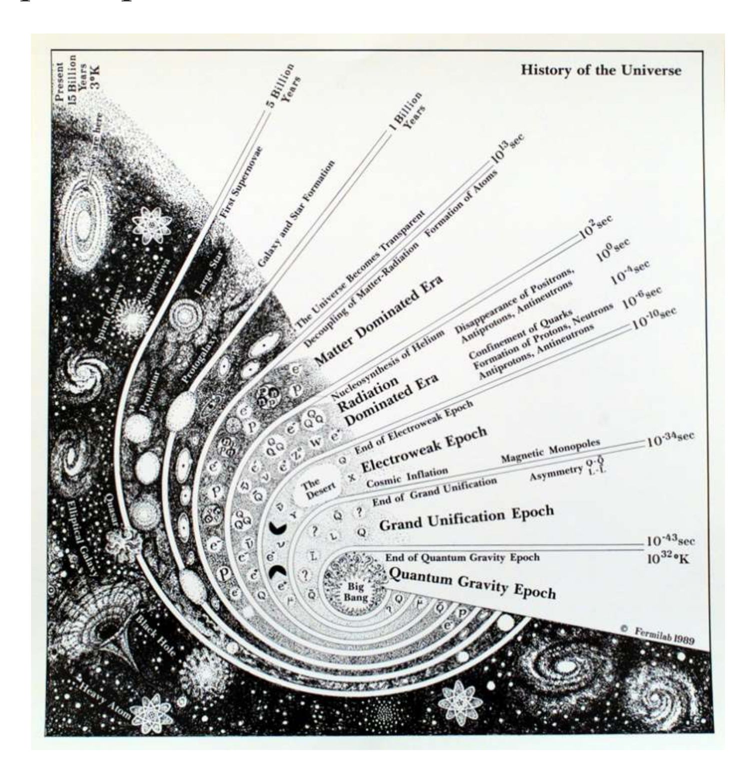
En los primeros pasos nos ayuda la teoría del Modelo Estándar de física de partículas. Un modelo teórico cuyas predicciones se vienen comprobando con exquisita precisión. Conjugando la Física Cuántica de Campos, la Relatividad Especial y los datos que proporciona la medida de lo observado, el Modelo Estándar nos va a acompañar durante la explicación, posible o probable, de los inicios del Cosmos. No en toda su extensión temporal hay que avisar, porque, al igual que no conocemos lo anterior al punto de partida, tampoco conocemos, ni tenemos herramientas para teorizar y poder luego comprobar, acerca de una buena parte de las cosas interesantes y cruciales que sucedieron en los primeros momentos. Corto espacio de tiempo, pero, repito, crucial. A medida que la historia discurre tenemos ya teorías e instrumentos que nos permiten conjeturar, e incluso vivir, las incógnitas de la niebla inicial.

Por tanto: momento anterior al inicial, desconocido; momento fundacional 0/∞, obviamente lo mismo… ¿quién puede meter la cabeza en la incongruencia del cero infinito? Quizás algún día. Sigamos.

Tres constantes físicas fundamentales de nuestro Universo nos definen el primer escenario que creemos poder imaginar. Imaginar, que no medir. Suponemos que este espacio real en un tiempo ya real tendría unas dimensiones físicas exiguas y unas densidades de energía y temperatura gigantescamente inimaginables. Las tres constantes son *c*, la velocidad de la luz; *G*, la constante gravitatoria universal; y *h*, la constante de Plank. Con las tres, y solamente con ellas tres, podemos definir este diminuto y superpotente punto inicial.

Carnet de identidad del espacio-tiempo inicial: en el momento igual a un “tiempo de Planck”, $5{,}391 \times 10^{-44}$ segundos, tenía un tamaño de una “longitud de Planck”, $1{,}161 \times 10^{-35}$ metros. Almacenaba una energía equivalente a la “masa de Planck”, $2{,}176 \times 10^{-8}$ kilos a una “temperatura de Planck” de $1{,}417 \times 10^{32}$ K. Por debajo de este tamaño, se cree que el espacio deja de tener sentido.

Por debajo de este tiempo no hay tiempo medible. Éste creemos fue el punto de partida. Para saber algo de él, un mundo cuántico de energías einstenianas, tendríamos que saber compaginar teóricamente la mecánica cuántica y la gravedad, cosa muy alejada de nuestras posibilidades actuales. Todo son conjeturas, no hay evidencias de un inicio a partir de una singularidad infinita, ni hay evidencias de que surgiera de un espacio-tiempo espumoso, ni siquiera surgió de la imaginaria idea acerca de un “huevo cósmico primigenio” que explotó.



La senda de expansión de nuestro Universo que nos acompañará a lo largo de esta serie (Imagen: Exploring the Universe, Edward W. Kolb, Fermilab, 1989, fair use)

Lo único que sabemos es que el mundo de Planck que hemos descrito como punto inicial encaja en nuestras teorías como posible punto de partida sobre el que, si se generó un proceso inflacionario, como siguen diciendo nuestras teorías, pudo construirse un mundo frío y en expansión: el que observamos hoy en día. Tras salir del mundo de Planck continuamos en las tinieblas del conocimiento durante una más que reducida época, que culminó cuando la inflación, el Big Bang, terminó. No tenemos medios para acceder experimentalmente al Cosmos de este momento. No podemos inferir nada especial a

partir del más profundo banco de datos disponible, como es el espectro de la radiación de fondo de microondas, emitida cuando el Universo tenía unos 380.000 años. No sabemos qué campos ejercerían realmente un papel en este momento. Suponemos que la física que funcionó en aquella época es la que conocemos. Quizás fueran unos momentos fríos y hubo que esperar al final de la inflación para calentar el ambiente. Pero todo son conjeturas. Suponemos que en algún momento de esta época el espacio-tiempo experimentó un gran tirón que lo expandió factores de amplitud gigantescamente impensables. Sólo lo suponemos, aunque tenemos muchas y serias agarraderas de que así tuvo que suceder y que son consistentes con muchas de las cosas que sí podemos observar hoy en día.

¿Y después de la inflación? Suponemos un mundo caliente y cargado de materia-radiación. Pero, aunque la teoría que conocemos la podemos aplicar, y de hecho es la que nos propone argumentos para el inicio, desarrollo y salida del Big Bang, no hay forma de poder comprobar si fue así, si las partículas que conjeturamos en este mundo post expansión son exactamente las que nacieron de la gran energía liberada tras el frenado de dicha expansión, o bien son un producto de nuestro raciocinio apto exclusivamente para nuestros libros. Nosotros vemos, encontramos nuevas partículas gracias a que podemos generar estados de suficiente alta energía como para poder colapsar las masas de estas partículas. Pero nuestra joya es el LHC que llega tan sólo a un poco más allá de diez TeV, 10^{13} eV, ¡cuando en el momento fundacional nos encontrábamos en la historia de un mundo energético que se movía en el entorno de 10^{28} eV!

Algo se podrá deducir de esta época por el estudio de la información implícita en el mapa de la radiación de fondo de microondas. La dispersión de las singularidades cuánticas generadas en estas épocas, e incluso anteriores. O la existencia de las primeras ondas gravitatorias creadas por el gran carajal gravitatorio que se vivió en aquellos momentos.

Momento t=10^{-35} segundos tras el Big Bang: inicio de la fase exponencial expansiva. **Momento 200 segundos**: se generan los primeros núcleos atómicos por la unión de neutrones y protones gracias a que el nivel energético cósmico es ya lo suficientemente

bajo, 200 KeV, como para dejar expresarse a la fuerza nuclear fuerte. En el interregno, suponemos que en algún momento se fueron independizando las dos fuerzas nucleares y la electromagnética, y que se fueron creando nuevas partículas, algunas de las cuales pertenecen al acervo cultural básico de la humanidad: protones, neutrones, electrones, neutrinos y fotones, … incluso la partícula de Higgs. Una "eternidad" antes, tiempo 10^{-14} segundos, las condiciones ya las podemos reproducir en nuestros laboratorios: había llegado el momento a partir del que encontramos ayuda y conocimiento en nuestros instrumentos. Y, como ya hemos comentado, el más potente, el que nos permite ver lo más profundo alcanzable por nuestra tecnología, el LHC. Con poderes en el orden de diez TeV, nos ha mostrado el nacimiento desde el bosón de Higgs de 125 Gev hasta todas las partículas, más aún que la nómina que listé unas líneas más arriba: los fermiones y bosones constituyentes de la materia más cercana a nuestra esencia humana.

No sólo el LHC, sino que también para esta época disponemos de nuestro Modelo Estándar, cuyos resultados teóricos vienen siendo confirmados por los resultados experimentales de nuestros aceleradores de partículas, lo que nos da esperanzas de que este modelo también sea correcto a energías mayores, y por tanto en tiempos más tempranos. Lo cual es una barbaridad, pues este límite del LHC está situado en los 10^{-14} segundos tras el Big Bang. De allí para acá, ya no nos movemos por una inestable alfombra teórica. Desde este momento podemos tener evidencias de lo que pasó en nuestro joven Universo.

Hemos echado un vistazo a cuán real es lo que podemos saber antes de la nucleosíntesis. Realmente empezamos a sentirnos confortables con la historia que vamos a contar. Después…. Después de la nucleosíntesis estamos mucho, pero que mucho más cómodos. La historia es casi real.

El confort es de tal calibre porque tenemos fuertes evidencias de que nuestras teorías son correctas y de que nuestras matemáticas son superpotentes y, por tanto, sus deducciones exactas. Sabemos aplicar la teoría de la relatividad especial de Einstein y las teorías cuánticas a un mundo post inflacionario, que seguía una curva descendente de

temperatura. Con estas teorías se llega a predecir, sobre el papel y el cálculo, qué núcleos de elementos químicos y en que proporción se pudieron producir en tal entorno. Por simplificar: 75% hidrógeno/25% helio… lo demás es marginal. La realidad que observamos se ajusta perfectamente a estas previsiones teóricas. Vamos bien. Tenemos confianza en lo que decimos para estos momentos. Pero vayamos más allá.

Año 380.000 tras el Big Bang. Una temperatura de unos 3000K, ya lo suficientemente baja como para que la atracción electromagnética entre las cargas negativas de los electrones, hasta entonces libres, pudieran unirse a las cargas positivas de los protones o de los núcleos de deuterio o helio, generando los primeros átomos en la historia del Universo. El espacio quedaba libre para que corrieran también libremente los fotones, que hasta entonces se habían estado dando codazos en un tú a tú con los electrones. En las zonas de mayor densidad bariónica los fotones eran más energéticos. En las de menor densidad eran menos energéticos. Lo más glorioso es que hemos podido hacer una foto de la familia fotónica de aquel momento, un reflejo fiel de la distribución de las masas a lo largo de todo el volumen del pequeño universo de hoy en día. Fotones ancestrales, que aún a día de hoy andan por todos los lados a la velocidad de la luz.

A partir de este momento, con la confianza puesta en que el “cielo” se había aclarado, se había vuelto transparente, y con la confianza de que nuestras teorías funcionan, con la confianza de que la gravedad universal tal como la conocemos mueve de la forma que sabemos a los astros celestes, próximos o lejanos, a velocidades terrestres o relativistas, sabemos que sabemos… o que podemos saber. Podemos experimentar lo que pensamos. La sofisticada tecnología de telescopios trabajando en un amplio rango de frecuencias y las infinitas posibilidades que nos brinda la tecnología de espectrometría de la luz nos permite ver más allá de la banda de frecuencias electromagnéticas visibles. Hemos visto cuásares y galaxias de hace unos 200 millones de años tras el Big Bang. De ahí a hoy en día, 13.800 millones después,[1] se extiende un mundo confortable para la ciencia. Con lagunas, sí, pero en el que nos sentimos seguros.

Toda esta historia es la que me dispongo a contar. Ya sabemos que una parte son suposiciones y que otra son realidades. Iremos a por ello en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 01:

1. He optado por esta cifra como la mejor edad que tenemos ahora mismo del Universo. Realmente es de unos 13,798 +/- 0,037 miles de millones de años según la misión Planck de la European Space Agency, 6 de junio de 2014.

   [https://arxiv.org/pdf/1303.5062v2.pdf , tabla 10, página 40]

02: Momento cero

t = 10^{-43} segundos

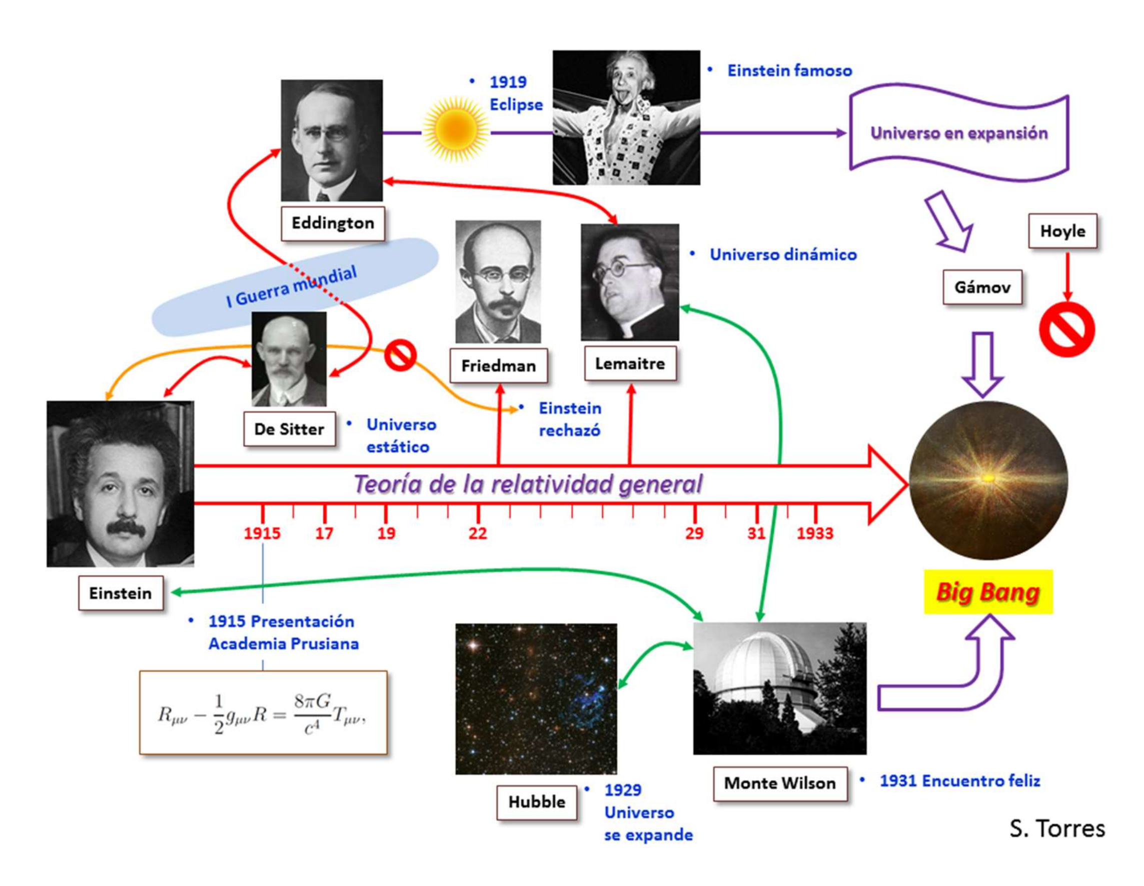
Tras el introductor capítulo anterior, en el que intenté explicar el contenido y propósito de este libro titulado “*Biografía del Universo*”, viene este en el que ya vamos a entrar en materia. Para empezar, me voy a tomar la confianza de repetir uno de los primeros párrafos del capítulo anterior, como recordatorio de algo muy real:

“*Ciertamente nadie en este mundo, el de las x,y,z y t sensibles, sabe de dónde viene nuestro Cosmos ni cómo fue su primer instante. Y si alguien dice que tiene la clave miente como un bellaco. ¿Nació en aquel incógnito momento el entramado del espacio-tiempo que conocemos? ¿o fue simplemente una extensión 0/∞ de otro ya existente? O como en el cuento imaginado: ¿resultó un rebote de algo anterior? ¿o surgió exnovo del vacío? Pero ¿qué es el vacío? Podemos imaginar, inventar, conjeturar… pero no sabemos nada de nuestro momento t=0 -¿y si no hubo t=0?-. Aunque menos aún que menos sabemos de t<0*”.

Es una época de niebla en nuestro conocimiento. No tenemos herramientas teóricas para estudiarlo deduciendo certezas. Ni capacidad técnica para comprobar nuestras deducciones, a pesar de que hay una buena nómina de buenos y serios hombres de ciencia que se fajan a fondo con ello. Quizás alguno de ellos sea de categoría einsteniana y nos descubra el antiguo mundo. Pero, hoy por hoy, no sabemos nada.

Nosotros confiamos en dos cuerpos de teoría: la relatividad de Einstein -en sus dos facetas, la especial y la general- y la teoría cuántica de campos. A fuer de ser horriblemente simple diré que la primera entiende de lo grande y la otra de lo pequeño.[1] Al conjuntar lo grande y de energías relativistas con el mundo de lo pequeño y de incertidumbres cuánticas hemos podido calcular un Universo teórico que se expande. Y funciona muy bien -la realidad observable coincide con las previsiones- asegurando unas hipotéticas condiciones

iniciales de gran densidad y temperatura. ¿En qué momento? Ni idea, pero teóricamente funciona.



Breve -y simpático- esquema de los pioneros cerebros pensantes (Imagen: Sergio Torres Arzayús, fair use)

Aunque a decir verdad no sólo funciona teóricamente, sino que, repetimos, también es lo que se observa. En los años 20 del siglo pasado un gran astrónomo llamado Edwin Hubble se dedicó a estudiar los resultados obtenidos al aplicar técnicas espectroscópicas a la luz que venía de lo que se suponía estrellas de la Vía Láctea. La luz que llega de ellas lleva una impronta, unas bandas características, que depende de los niveles energéticos de las órbitas electrónicas de los átomos que las contienen, y se le conoce como el *espectro de emisión*. Estas bandas no dejan de ser más que la huella de unos fotones de una determinada longitud de onda, que se han gestado como consecuencia de saltar en un átomo un electrón previamente excitado desde su orbital de mayor energía a uno interior y menos energético. La longitud de onda del fotón emitido en ese proceso se ajusta a la diferencia de energías entre ambos orbitales de acuerdo a

la conocida correlación propuesta por Max Planck[2]. Si la estrella en donde se encuentra ese átomo se aleja de nosotros, la longitud de onda del fotón se “estira”, apareciendo en la espectroscopia las bandas características situadas en el espectro de frecuencias más pequeñas a las que teóricamente le correspondería, lo que se conoce como “corrimiento al rojo”[3]. Pues bien, Hubble determinó con sus estudios que una gran cantidad de aquellas “estrellas” eran otras galaxias y no estrellas de la Vía Láctea, y que además se alejaban de nosotros, con la circunstancia de que **cuanto más alejadas estuvieran lo hacían a mayor velocidad**.

Eso de que el Universo se expande, que en el fondo es la causa de que todo se aleje de todo, ya se lo había encontrado Einstein. La formulación que sigue es la ecuación de Friedmann, simplificación de las de la Relatividad einsteniana para un universo uniforme y homogéneo. En el mundo de la Cosmología es de gran trascendencia, ya que describe la dinámica de la expansión. En ella, el factor *H* es la constante de Hubble, que da idea de la velocidad de esa expansión.

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - K\frac{c^2}{a^2}$$

que podemos redefinir como:

el cuadrado de la velocidad de expansión del universo por unidad de longitud

es igual a

una función que depende de su masa y energía, menos otra función que depende de su geometría

Sabido lo anterior, era casi lógico el que se llegara a la siguiente idea: “*Entonces, si hay una marcha “adelante” real y las ecuaciones la describen bien siguiendo el sentido de la expansión, teóricamente* –OJO, digo teóricamente- *podemos conjeturar lo que pasó antes del momento inicial de nuestros cálculos* -que no es el momento inicial del Cosmos- *haciendo una regresión de los mismos*”. De forma que si hacia delante vamos a un volumen cada vez mayor, hacia atrás llegaremos a una dimensión puntual: todo concentrado en la realidad

adimensional de un punto. No es solamente que este estado incomode a las matemáticas por añadir un difícilmente manejable infinito, sino también porque a escalas pequeñas -en donde necesariamente entra la cuántica pero, por otro lado, deberemos recurrir también a la relatividad, dado que los efectos gravitatorios en un mundo de altas energías son inimaginables- vamos a necesitar una teoría gravitatoria cuántica. Y aunque los científicos se han planteado de qué manera se puedan incorporar las ideas de la cuántica a la interacción gravitatoria, aun es el día en que no hay una teoría que lo haya conseguido. No tenemos ni idea. Las aproximaciones de las que disponemos no funcionan en todo el rango. Quizás teorías matemáticamente más abstractas, como la de cuerdas, arrojen una luz. Pero hoy por hoy, a fuer de ser sinceros, no sabemos conjeturar con seguridad y consistencia lo que pudo suceder en un punto tan pequeño. Que, por otro lado, recuerdo, es simplemente una regresión de tipo matemático de las deducciones de la relatividad al forzar el reverso de la película teórica.

Por tanto, **no hay nada que nos asegure la existencia concreta de una singularidad inicial**, ningún factor, ni experimental ni matemático. Es una mera especulación muy usada, cuya simplicidad como idea posiblemente ayuda a entender.

Pero esto no es un freno para los imaginativos teóricos. Ésos que no se arredran al enfrentarse ante la sugerente idea de que, en el límite, todo se iguala. Aquellos que persiguen la esperanza einsteniana de que hay una ley que compendia **todo** lo que experimentamos. Y cuyas propuestas se recogen en teorías con nombres tan sugerentes como la de la *gran unificación* (GUT), o la de la *supersimetría* (SUSY) o la de cuerdas, que en su aspecto más integrado se la conoce como la *teoría M*. Son teorías que parecen conciliar la existencia de la cuántica con la gravedad; que parecen asegurar la confluencia energética de tres -electromagnética y las dos nucleares, fuerte y débil- de las cuatro fuerzas fundamentales que conocemos a día de hoy. E incluso la gravitatoria. Son una razonable base donde apoyarnos e imaginar lo que suponemos que pueda haber sido.

Imaginar es fácil. Así que me permito visualizar -pura figuración- los inicios comenzando la historia en un mundo de burbujas cuánticas,

en un estado del espacio-tiempo de consistencia espumosa. Puede que cada una de estas burbujas cuánticas fuera una estación de tránsito cuasi-puntual a donde había llegado un universo anterior. No lo sabemos, pero es un aceptable comienzo que no contraviene a nuestras teorías y experiencias. Admitamos, por tanto, la existencia de un tejido espacio-temporal, compuesto por un entramado de elementales cuantos "ordenados" por dimensiones -cuatro, once, veintiséis…-, vacío -es decir sin energía ni materia en su estado más estable- pero sometido a las realidades ineludibles de la física cuántica. La cual nos dice que a partir de este vacío es posible que se genere energía de la nada, incluso grandes cantidades, siempre y cuando exista durante una fracción de tiempo lo suficientemente corta como para que no se viole el principio de *incertidumbre de Heisenberg*. Técnicamente, al medir simultáneamente ciertos pares de variables conjugadas, si necesitamos apurar mucho con la precisión de la medida de una de ellas, irremediablemente veremos que se nos impone el ser muy laxos en la precisión de la medida de la otra, ya que el producto de ambas precisiones debe ser mayor o igual que un numerito que descifró Planck, su constante ħ, del orden de 10^{-15} electrón-voltios por cada segundo. Que en formuleo queda como sigue:

$$\Delta E \times \Delta t \geq \hbar$$

Uno de estos pares conjugados son la posición y el momento lineal. Otro lo forman la energía y el tiempo. Por lo que la incertidumbre nos asegura que la *energía* y el *tiempo* durante el que esta energía es real no puedan medirse simultáneamente con una precisión arbitraria. Es decir, que a escala microscópica, si precisamos con gran exactitud el valor del tiempo no nos quedará más remedio que admitir una gran desviación en la exactitud de la medida de la energía. Lo que nos deja un amplio campo de posibilidades, con su mayor o menor probabilidad, para que aparezca "mágicamente" de la nada una gran cantidad de energía… que va a durar en la existencia menos que un mini suspiro. Tras el periodo de tiempo que encaje según la anterior ecuación con la cantidad de energía nacida, ésta vuelve a ser recogida por el campo emisor que vuelve a su vacío.

Sólo por hacernos una idea: En el mundo de Planck, cuyas magnitudes introdujimos someramente -y no hacía falta más- en el capítulo anterior, se nos sugiere una energía del orden de los 10^{28} eV. Así que ustedes calculen: la teoría nos insinúa que en un espacio-tiempo vacío de energía, si hay que desarrollar este mundo minúsculo, que se asimila al más primigenio de 10^{28} eV, según el principio de incertidumbre tendríamos de tiempo tan sólo la constante de Planck, 10^{-15} electrón-voltios por cada segundo, dividida por esa incertidumbre en la energía del orden de 10^{28} eV. Lo cual nos dice que podríamos obtener esta energía durante un tiempo medido con una incertidumbre de 10^{-43} segundos -¡anda!, muy parecido al tiempo de Planck- para darnos prisa y hacer el trabajo. Si además el mundo está expandiéndose a una velocidad tal que los pares de partículas "virtuales" que materializan esta energía se separan tan rápido que no vuelven a interactuar entre ellas y desaparecer, tendremos un mundo en marcha. Y una ¿casualidad? más: si ponemos a la luz a correr a su inmutable velocidad de 300.000 kilómetros por segundo durante este tiempo de Planck, recorrería una distancia igual a la longitud de Planck. Curioso. ¿Es que la teoría nos está intentando sugerir que el universo está íntimamente constituido por unos parámetros que indican que para el tejido del espacio-tiempo no haya tamaño más pequeño que la longitud de Planck? **¡Un espacio-tiempo cuantificado!** ¿Un cuanto como semilla del Big Bang?

Con eso no digo que ésta fuera la historia, sino que esto es lo que nos sugiere una posible matemática, realmente más compleja que los tontos cálculos del párrafo anterior, que desarrolla los mundos de la relatividad y la cuántica. Es decir, hay opiniones que contemplan la posibilidad, por demostrar, de que todo surgiera en un cuanto del espacio-tiempo, en una de las infinitas fluctuaciones cuánticas que se deben suceder en este espacio-tiempo: un robo al vacío de un campo desconocido, por el que surge mucha energía en un corto espacio de tiempo. Si el cuanto del espacio-tiempo escenario del suceso está en un proceso de expansión, es posible que el suceso sea irreversible.

La idea de un espacio-tiempo inicial cuantificado nos permite seguir motivando a nuestra imaginación. Uno de los pensamientos que surgen nos lleva a la idea de que si el cuanto mínimo de tiempo es el

de Planck de 10^{-43} segundos, realmente **nunca hubo un tiempo de valor cero para nuestro universo**. Luego… no busquemos qué fue lo que pasó en t=0, lo cual incluso satisface a muchos, ya que entonces no habría una singularidad inicial que invalide las ecuaciones de la Relatividad.

Otra idea que se nos ocurre se deriva del hecho de que en cualquiera de los minúsculos cuantos planckianos que conformaron el espacio-tiempo inicial se producirían continuamente inestabilidades, durante las que aparecían y desaparecían partículas virtuales. Al ser la zona espacio-temporal donde eso pasaba tan pequeña, la energía de movimiento de dichas partícula sería muy grande: a espacio más confinado, velocidad -energía de movimiento- más elevada. Lo cual no deja de ser un reflejo más de un nuevo enlace de incertidumbres, ahora entre otras dos variables conjugadas como son la posición y el momento lineal de las partículas. Mucha energía que, si recordamos lo que nos dijo Albert Einstein, deformaría el tejido del espacio-tiempo… lo cual es la base de la interacción gravitatoria. Es decir, **la gravedad tuvo que independizarse ya en el mismo momento inicial**. Sin contravenir las teorías GUT de unificación de fuerzas[4].

La gravedad es una fuerza atractiva y universal. Para no sentir su efecto teóricamente nos tenemos que desplazar hasta el infinito, alejados del origen de masas gravitatorias. Si queremos desplazar un objeto con masa desde cualquier punto también con masa -por ejemplo, la superficie de la Tierra- hasta el infinito, tendremos que luchar contra esta fuerza atractiva. Lo cual nos indica que el potencial gravitacional en el punto de partida es menor que el de llegada, es decir, le hemos tenido que dar energía a la masa que desplazamos. También lo podemos ver al contrario: cuando en algún momento anterior la masa del ejemplo se había situado en el punto de partida -la superficie terrestre- de menor potencial, en el proceso la gravedad habría quitado energía a dicha masa. Si lo pensamos en la superficie de la Tierra, una piedra que cae[5] va perdiendo energía potencial gravitatoria… aunque bien es cierto que esta energía que pierde la gravedad se la va devolviendo en forma de energía de movimiento. La conclusión es que *la gravedad, en su trabajo de atracción, lleva implícita una energía negativa*. Dicho esto ¿qué hubiera pasado si

toda la gravedad, en aquellos momentos iniciales, estuviera introduciendo una energía, que ya sabemos que es negativa, igual a la de la masa equivalente a aquella energía inicial que surgió robada del vacío cuántico? Que esta fugaz energía inicial pudo haber sido contenida en el tiempo gracias a la gravedad que indujo. Una por otra… promedio cero. Lo que nos permite razonablemente poder hacer la siguiente hipótesis: el cuanto constituyente del tejido básico del espacio-tiempo universal -y pudo haber infinitos cuantos, aunque eso nos llevaría a otra discusión- se vio sometido a un "destello" de energía que lo expandió y deformó, **permitiendo la gravedad asociada el que esa energía permaneciera en el tiempo**. Con ello se había creado nuestro eje de coordenadas temporal.

energía cuántica fundacional + (-energía gravitatoria) = cero:

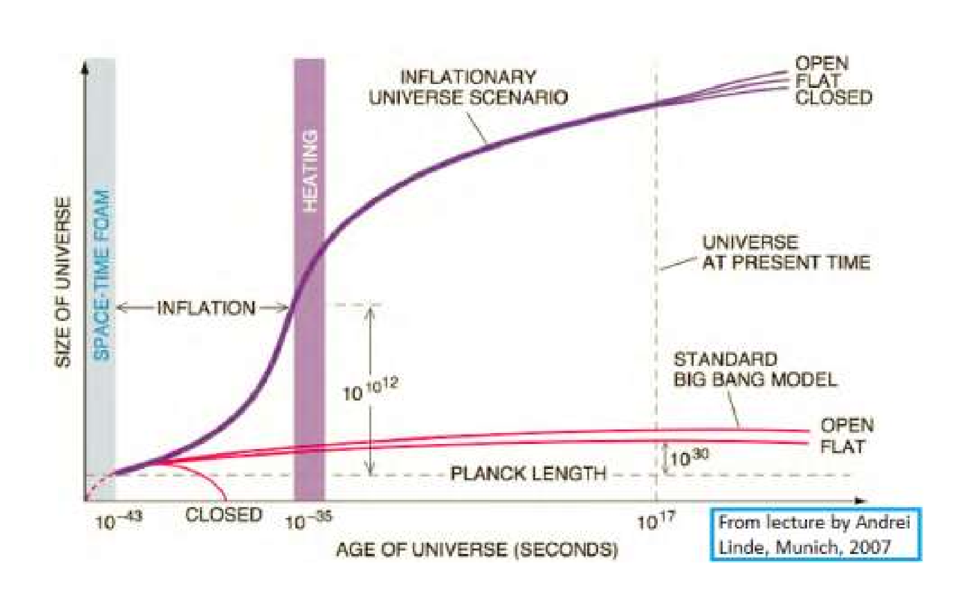
una posible explicación del inicio de todo[6]

Esta determinada función de circo cósmica es el punto de partida para las teorías más sólidas de la evolución del Universo. Aunque insisto: el hecho de que sean sólidas, y que lo que digan se ajuste a la realidad observada, no las hacen más reales: seguirán siendo conjeturas mientras la realidad de los inicios permanezca escondida en la niebla del desconocimiento humano. Esto quiere decir que quizás el tiempo, como tal lo imaginamos, no existía en aquellos ¿momentos? Y quiere decir que tal vez la física que manejamos, y en la que confiamos, no era aplicable en aquella "esfera" mínima y deformada de espacio-tiempo. Y quién sabe si realmente aquel momento fue superenergético o superdenso. O si fue el inicio o simplemente la continuación de algo. No lo sabemos. Nos intriga el desconocimiento, pero no nos desazona, ya que realmente podemos sentirnos "llenos" con todo lo que imaginamos saber a partir de la teoría. Conjeturas muchas de ellas que hemos podido comprobar que son reales en el mundo frío y poco denso, casi vacío, en el que vivimos.

No hay singularidad inicial, el espacio-tiempo está cuantificado; el Universo se expandía desde el inicio; no hubo origen de tiempos en un valor cero; surge una energía del vacío en un instante de inestabilidad cuántica; la gravedad se manifiesta en un primer momento; la gravedad ata a la energía primera; y cuántas

circunstancias más pudieron tener lugar… Estas son las conjeturas y la teoría del tiempo $t=10^{-43}$ segundos.

A partir de ahí, el amoldar esta teoría con la realidad parece exigirnos, como veremos en otro capítulo, un episodio de una gran expansión del tejido espacio-tiempo. Más rápida que la velocidad de la luz. Al final de la cual se creó la materia y la radiación.



La senda de expansión de nuestro Universo (Imagen: Andrei Linde, fair use)

La figura anterior que procede de unas lecciones[7] del cosmólogo Andrei Linde, nos permite apercibir de un solo vistazo los escenarios que dibuja la teoría -que veremos con un poco más de detalle en un capítulo posterior-. Como vemos, según él todo surge a partir de una espuma espacial, espuma de burbujas en las que se habría condensado la estabilidad. Durante un cortísimo espacio temporal inicial las burbujas se irían uniendo inmersas en un entorno que sigue en expansión. Llega el momento en el que la inflación empieza a acelerarse siguiendo una excursión exponencial que finaliza produciendo un Universo caliente y expansivo. Esta expansión, que ya no inflación, continuó después mucho más ralentizada. Y hasta el día de hoy. También hay otros escenarios hijos de la teoría los cuales se van configurando de acuerdo a la cantidad de energía en juego y de acuerdo a si se contempla o no el periodo de

inflación exponencial. Escenarios que se mueven desde el que postula que un exceso de gravedad colapsaría relativamente pronto el proceso de creación de un universo, hasta el contrario que dejaría al tejido espacio-tiempo como una tenue niebla vacía y congelada. En el siguiente capítulo intentaremos entrar en los laberintos del periodo de inflación que llevó al calentamiento del Universo.

NOTAS DEL CAPITULO 02:

1. Tengo que aclarar aquí un tema. Ya es conocido cómo la relatividad tiene dos cuerpos de teoría: la especial y la general. La especial surgió como resultado del estudio del movimiento de los cuerpos sometidos a las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell, y no tenía nada que ver con la gravedad. Cosa de la que hasta el propio Einstein fue consciente, pues no en vano se puso a pensar hasta que encontró su teoría de la relatividad general, que sí se trata de una teoría gravitatoria. La gracia está en que la primera parte sí podía ser estudiada usando la forma de pensar cuántica de la física, mientras que la segunda, al ser una extensión de la física clásica, no. De ahí la dificultad de incorporar la visión gravitatoria a la visión cuántica, que trabaja un mundo en que la gravedad pudiera ser irrelevante.

2. La longitud de onda es proporcional a la constante de Planck dividida por la energía.

3. Para más información podéis consultar esta entrada de otra serie también publicada en el blog "*El Cedazo*", *"El Universo - La corta historia de la fascinación por algo tan grande"* (https://eltamiz.com/elcedazo/2011/04/14/descubriendo-nuestra-galaxia-los-espectros-estelares-y-las-nubes-de-gas/).

4. En otro capítulo veremos qué es eso de la GUT.

5. Recordemos que la caída es el resultado de la interacción con el campo gravitatorio. La gravedad le hace caer, le lleva a un lugar de potencial menor, le roba energía… o bien le da energía negativa.

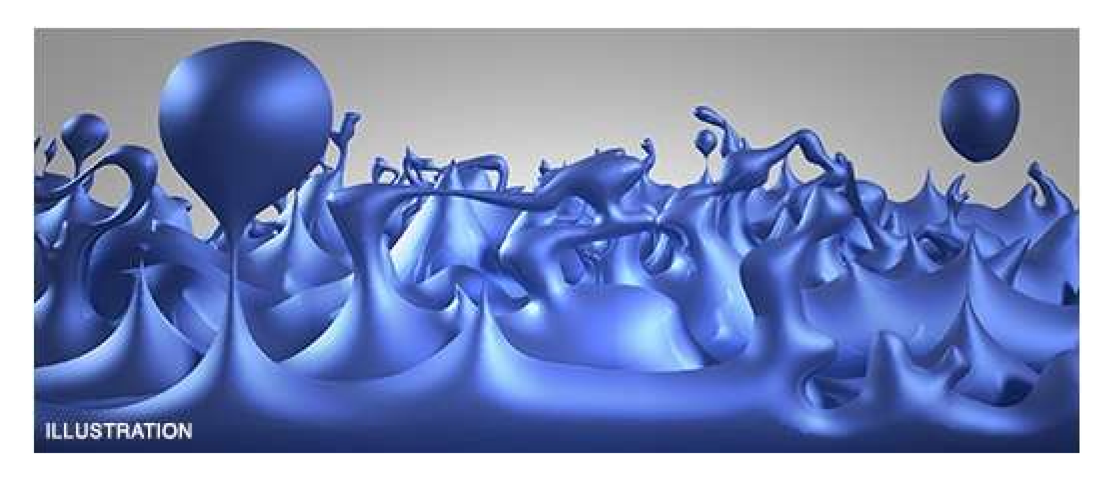
6. Otra forma de decir lo mismo que me parece muy intuitiva la expone el profesor Leopoldo Infante que dijo: *"… si la*

densidad de energía en el universo es justo la necesaria para que éste se expanda a una velocidad constante, entonces la energía asociada a ese movimiento es igual a la energía asociada a las distancias entre las partículas. Dicho de otra forma, la energía cinética es igual a la energía potencial. Ahora bien, como la energía de un sistema material es la suma de estas dos energías, entonces la energía total debe ser exactamente cero. En otras palabras, el universo nace de la nada y no hay que hacer para crear un universo".

03: Las edades de Planck

de 10^{-43} segundos a 10^{-35} segundos desde el inicio

En el capítulo anterior hablamos de los comienzos perdidos en la niebla del conocimiento. Y hacía yo mucho hincapié en que no sabemos nada de nada. Nadie sabe lo que pasó en los primeros instantes. Simplemente podemos conjeturar en base a aplicar un "retroceso temporal" a los complejos cálculos que nos sugieren las teorías de la relatividad especial y la cuántica de campos. Insisto, son sólo conjeturas, aunque en honor de la verdad las propuestas salidas del cálculo, estas conjeturas son las que encajan prácticamente como anillo al dedo con el mundo que hoy en día observamos y experimentamos. Ligeramente esperanzados o claramente afirmados en estos apoyos, sigamos intentando clarificar las brumas. A través de ellas parece entreverse una posible historia enraizada en los matices que se apuntaron en el capítulo anterior acerca del "universo espuma" como base ¿eterna? del tejido espacio-tiempo, en donde burbujea la cuántica y nace la gravedad como deformación producida por la energía interna.



Representación artística del Universo en sus escalas más pequeñas propuesta, entre otros, por la NASA (Imagen: NASA/CXC/M.Weiss, fair use)

El escenario: el tejido espacio-temporal vacío, ni energía ni partículas, y potencial a nivel cero. ¿Cómo de grande? No lo sabemos. De hecho, no sabemos siquiera si éste fue el escenario. Pero vamos a jugar con esta hipótesis. Un tejido que bien pudiera estar cuantificado por el rigor que impone la longitud o el tiempo de Planck. En estas semillas, el mundo de lo más pequeño, impera la ley de la mecánica cuántica. El principio de Heisenberg, del que hablamos en el capítulo anterior, nos dice que en este entorno es posible la aparición de mucha energía durante un corto espacio de tiempo. Esta energía es la manifestación de un campo intrínseco a este cuanto de espacio-tiempo energizado. Aunque en estos tamaños no tenemos ni idea de cómo funciona la gravedad, ya que la teoría de la relatividad desgraciadamente no puede decirnos nada ahí -no tenemos ni idea de cómo funciona en las pequeñísimas escalas-. Podemos conjeturar con base a la idea de que, al haberse creado una energía a partir del vacío, esa energía produce gravedad, o lo que es lo mismo, deforma el tejido espacio-temporal. Creando así una burbuja expansiva. Esto sucedería en todo momento en cualquier punto del completo escenario, por lo que podemos llegar a la conclusión de que el espacio-tiempo, en su ámbito más general y absoluto, tiene una apariencia espumosa[1]. Lo cual incluso nos podría llevar hasta otro tipo de consideraciones relacionada con multiversos, que aquí no son nuestro propósito.

Antes de seguir, repito una vez más: ésta es una historia teórica, no tuvo por qué ser una historia real, aunque a lo mejor fue así. Hoy creemos tener forma de calcularla, pero no podemos observarla. Quizás en un futuro podamos tener la foto primigenísima de las ondas gravitatorias -sí, el espacio-tiempo ondula ante una dinámica de variación de masa- surgidas en las perturbaciones de energía de aquel momento.[2] Pero sigamos con la novela, volviendo al momento en que una de aquellas burbujas ha comenzado a tener vida propia. Un pequeño trozo del tejido espacio-tiempo se estaba expandiendo. Había robado energía de algún campo desconocido, quizás del propio espacio-tiempo, en una cuantía que es desconocida para nosotros. Sólo sabemos que hoy en día observamos en la radiación de nuestro Universo una energía equivalente en masa del orden de 10^{53} gramos. En los tiempos del espacio de Plank, donde se apoya el inicio para

nuestras teorías, la temperatura del mini-universo -o la energía, que tanto da- era 10^{32} veces mayor que la de ahora. Luego para "crear" el Universo que conocemos tenemos que pensar que en su arranque la energía de la radiación primigenia debería ser del orden de 10^{85} gramos. Desde luego, es mucha, pero igual si nos asomamos al único banco energético del momento, el de Planck, podemos encontrar un activo suficiente para prestar lo que necesitamos: 10^{85} gramos. Desgraciadamente, parece que tenemos un problema de difícil solución, ya que la masa de Plank es tan solo del orden de 10^{-5} gramos.

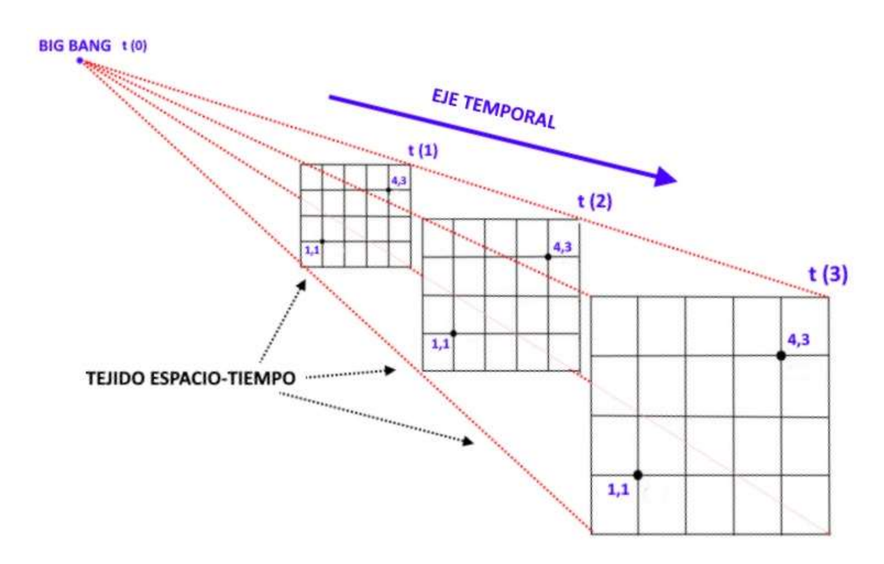
¿Cómo se pudo pasar de una a otra? No adelantemos acontecimientos y vayamos paso a paso. Estamos en una situación de un universo que decimos pequeño, con mucha energía y que se expande. ¿Cómo sabemos que nuestro pequeño espacio se estaba expandiendo si no podemos medirlo? ¿Y por qué se expande?, e incluso ¿qué tenemos que entender cuando hablamos de que el tejido espacio-tiempo se expande?

La primera pregunta ya la contestamos en el capítulo anterior. Básicamente es que debemos suponer que se expandía. Hoy somos capaces de observar que nuestro universo lo está haciendo e incluso podemos medir a qué velocidad y con qué aceleración lo hace. Si hoy se expande aceleradamente no es muy arriesgado pensar que si pudiéramos poner esta película marcha atrás observaríamos cómo se va contrayendo de forma cada vez más pausada. Lo cual nos lleva a la idea teórica del punto inicial del Big Bang. Volviendo de nuevo el vídeo al *forward,* no nos queda más remedio que imaginar que este punto se expandía. Por otro lado, tenemos una teoría muy consistente, la de la Relatividad, que nos explica matemáticamente cómo lo hace: el Universo tiene que seguir una dinámica espacio-temporal que satisfaga una relación directa entre la geometría del universo y su distribución de energías. De forma que su variación de escala, en nuestro mundo de curvatura aparentemente nula, ha de seguir la siguiente ecuación:[3]

$$\ddot{a}(t) = -K(\rho+3p)\,a(t)$$

en la que **a(t)** nos dice en cuánto varían las dimensiones del universo (y con dos puntitos es su aceleración), **ρ** es la densidad de energía de los campos presentes en el universo y **p** la presión que generan estos campos.

El Universo, por tanto, se expandía desde sus momentos primigenios. El fenómeno sólo afectaba a su propio tejido espacio-temporal y no a su contenido, que queda bajo el efecto de otras fuerzas, como la gravedad.[4] Como si estirásemos un mantel de caucho: el propio mantel se agrandaría, pero no las migas de pan que estuvieran sobre él. La pantalla de la película que hoy mide un metro, mañana medirá dos. Las partículas de polvo sobre ella seguirán igual, eso sí, pero cada vez más alejadas unas de otras, aunque también pudiera ser que dentro del contexto expansivo se estuvieran aproximando relativamente unas a otras gracias a la acción mutua de sus interacciones gravitatorias. No, la expansión que "engorda" al Universo no nos engorda a nosotros, como podemos colegir de la siguiente figura que intenta aclarar la realidad de lo que sucede.[5]



Atención: El eje es temporal y no espacial. No se expande la imagen por efecto de una perspectiva espacial, sino que es más grande a medida que avanza el tiempo.

Pero ¿por qué lo hace? ¿Cuál es la causa que hace que se expanda? Es más, lo sigue haciendo justo en este mismo momento en que lo escribo y en el mismo momento que lo lees. También tenemos teorías para explicarlo, aunque la solución la vamos a aclarar con detalle en

el siguiente capítulo. No os inquiete la curiosidad. Ahora, supuesto ya entendido qué es esto de que *el universo se expande*, sigamos una vez más con nuestra historia interrumpida.

Todo había empezado a los $t=10^{-43}$ segundos, cuando una "excursión" cuántica de energía seguida inmediatamente por la aparición de la gravedad, había generado nuestro pequeño y dinámico escenario. En el momento de partida tenía un nivel de energía de 10^{19} GeV que pronto decayó, gracias al efecto expansivo que enfriaba nuestro universo, hasta unos 10^{15} GeV, en el tiempo $t=10^{-35}$ segundos. Esta energía era suficiente como para que de ella apareciesen pares partícula-antipartícula, cualquiera que tuviera una masa -lo que equivale a energía en reposo-[6] inferior. Es decir, todas las partículas que podamos imaginar incluidas las exóticas de la materia oscura que a día de hoy no sabemos ni cuáles son. Los componentes de cada par de partículas en aquel universo tan pequeño estaban muy próximos, así que tan rápidamente como aparecían desaparecían, aniquilándose mutuamente y dejando un rastro de energía.

Además de la gravedad, durante todo este periodo actuaba una sola interacción, una fuerza única en la que se identificaban la electromagnética y las nucleares fuerte y débil. El concepto de masa o de carga, ya fuera ésta de tipo eléctrica, de color o débil, no tenía sentido. Su campo asociado, conocido como **Campo Unificado**, mediaba su influencia a través de unos bosones de gran masa, conocidos como X e Y,[7] cuyas interacciones acoplan a las partículas más elementales que conocemos -quarks y leptones-,[8] y que son responsables de nuevos fenómenos, como la hipotética desintegración protónica. Y decimos hipotética porque la probabilidad de que se produzca es ínfima, aunque teóricamente posible. Al haber una sola fuerza fundamental, además de la gravedad, a este brevísimo periodo[9] se le conoce como el de la **Gran Unificación**.

Los bosones X e Y aparecerían de acuerdo a dos procesos físicos.[10] Uno se concretaba en la transformación de las partículas de radiación en pares de materia-antimateria X e Y, desapareciendo muy rápidamente en un estallido de energética radiación de fotones al interaccionar dichos pares entre sí. El segundo proceso correspondía

a la aparición de partículas virtuales en episodios de inestabilidad cuántica, partículas que saltaban instantáneamente dentro y fuera de la existencia cumpliendo los mandatos del principio de incertidumbre. Si lo particularizamos para nuestros bosones X e Y debemos pensar que se desintegrarían espontáneamente tras brevísimos instantes debido a su gran masa, de unos 10^{15} GeV,[11] creando quarks y antiquarks además de leptones y antileptones siguiendo algunos de los modos de desintegración siguientes:[12]

X → quark $_{up}$ + quark $_{up}$ **X → positrón^{+} + antiquark $_{down}$**

Y → positrón^{+} + antiquark $_{up}$ **Y → quark $_{down}$ + quark $_{up}$**

Y → antiquark $_{down}$ + antineutrino $_{electrónico}$

Se cree que estos bosones en sus ciclos de nacer-morir no cumplirían una de las simetrías de las leyes físicas, en concreto la CP -de carga/espacio-,[13] que es la que fija la igualdad entre la materia y la antimateria en estos procesos. La consecuencia de ello es que con el tiempo se iban generando más partículas elementales de materia que de antimateria. Los modelos que estudian estos fenómenos nos dicen que debido sólo a ello, y ya para todo lo que quedaba de futuro, cuando la materia y la antimateria se habían definitivamente aniquilado, la primera dominó a la segunda en una proporción de 1 entre 10^{9}.

Materia + antimateria ↔ fotón + fotón (*antifotón*)

La teoría de la Gran Unificación (GUT), que es con la que contamos para suponer lo que pudo pasar en estos momentos, nos dice que el anterior comadreo de patio de vecinos debió ser así hasta que la energía promedio del Universo bajó, por expansión y consiguiente enfriamiento, al nivel de 10^{15} GeV. Hago hincapié en que esto es lo que suponemos, ya que nuestro límite experimental nos lo da el LHC (Large Hadron Collider), que es el instrumento real con el que podemos penetrar más en la profundidad de las altas energías. Con él nos encontramos en la actualidad trabajando en el nivel de los 10 TeV,[14] muy alejados de las energías de un universo salido de las dimensiones de Planck. Pero también la GUT nos dice que aproximadamente en el nivel de 10^{15} GeV **la interacción nuclear**

fuerte dijo adiós a sus otras dos compañeras, la débil y la electromagnética. Estas dos últimas seguirían unidas durante un brevísimo tiempo hasta el momento en que el Universo se situó en un nivel energético un poco superior a los 10^3GeV. Esto sucedería más o menos en el tiempo 10^{-12} segundos desde el teórico inicio, momento en el que separaron sus interacciones.[15] Y es alentador el comprobar cómo los resultados de nuestros experimentos nos orientan hacia la realidad de este hecho, como podemos ver en la siguiente figura, con las tres fuerzas en una senda de aproximación a medida que aumenta la energía. Así que quizás la predicción de la GUT es correcta y las tres fuerzas fueron la misma antes de los últimos compases del periodo de inflación exponencial, coincidiendo en un entorno energético de 10^{15} GeV.

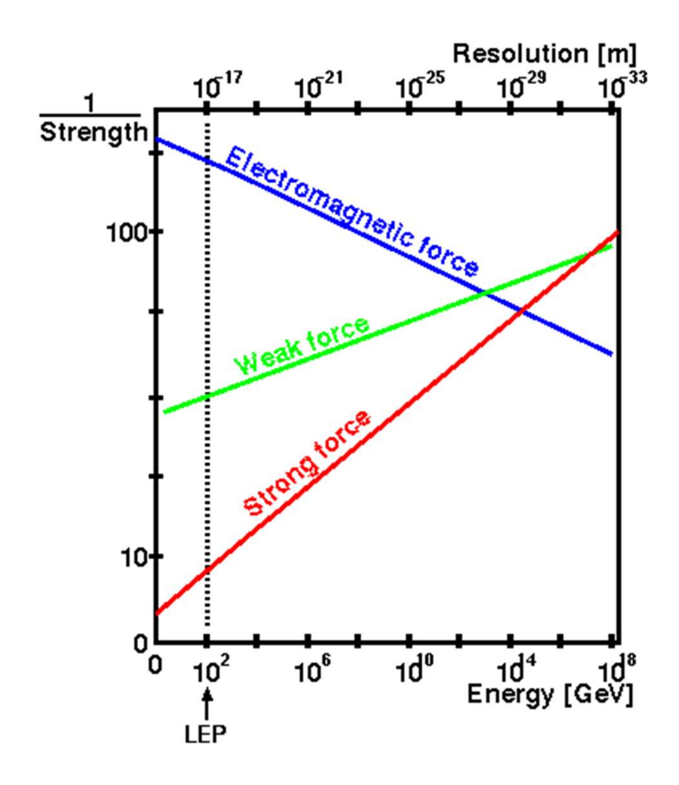


Diagrama que manifiesta la posible confluencia de las constantes de acoplamiento (strength) de las tres interacciones fundamentales de la física en un entorno energético de 10^{15} GeV. LEP, Large Electron-positron Collider, es parte del LHC, Large Hadron Collider, el cual trabaja en energías de hasta 10^4 GeV (Imagen de la red, fair use)

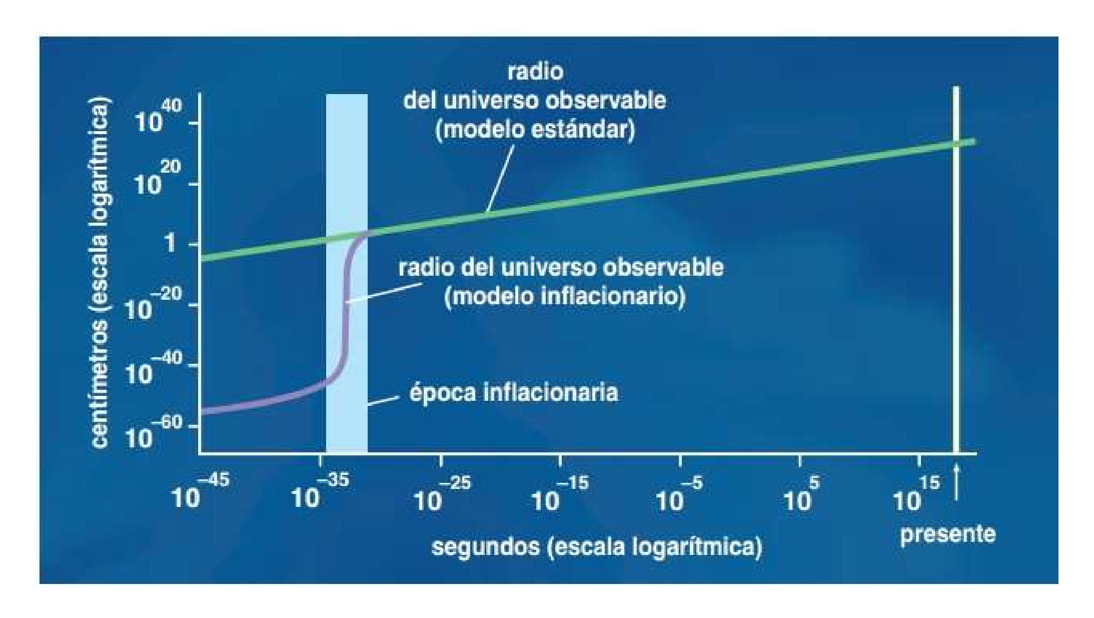
Así que más o menos en el momento $t=10^{-35}$ segundos, con una energía en el entorno de 10^{15} GeV, la generación de pares de bosones

X y de pares de bosones Y decayó[16] y tomó vida propia el campo de la interacción nuclear fuerte. A su lado había dejado a otro campo unificado que daba vida a las indistinguibles, por aquella época, interacción electromagnética y nuclear débil.

La separación de la interacción GUT en las dos nuevas, nuclear fuerte y electrodébil, supuso algo semejante a un cambio de fase en el Universo. Un cambio de fase[17] implica la existencia de una cierta cantidad de energía que no se utiliza para incrementar la temperatura sino, simplemente, para producir los cambios internos del sistema que experimenta tal cambio de fase. Se supone que el cambio de fase por la ruptura de la simetría de las fuerzas introdujo en el Universo una cantidad de energía que debió añadirse a la que sustentaba la expansión original. Puede que no influyera decisivamente en lo que vino después, pero sí es cierto que más o menos a partir de aquel momento se debió iniciar una gran excursión inflacionista en el tejido espacio-tiempo de nuestro Universo. Una expansión que duplicó cien veces su tamaño (lo que equivale a un factor de escala de 10^{30}), de forma que en el tiempo $t=10^{-32}$ segundos desde el inicio nuestro Cosmos, el universo pasó de tener un tamaño algo menor que un protón reducido en un factor de 10^{-20}, al de una “esfera” de 10 centímetros.

Quizás la primera idea de tal expansión inflacionaria la propuso el matemático, físico y astrónomo holandés especializado en cosmología Willem de Sitter, con sus desarrollos teóricos en la resolución de las ecuaciones de la relatividad de Einstein. Sitter concluyó que podía ser posible la existencia de un universo en el que no hubiera materia, pero sí una constante cosmológica positiva,[18] motor de una expansión exponencial. Una propuesta teórica que planteaba interrogantes de difícil solución. Alan Guth, físico y cosmólogo estadounidense, propuso una modificación a las causas que originarían tal inflación, con la que se lograba explicar algunos de estos interrogantes. Aunque dejaba otro problema: su inflación no era lo suficientemente “potente” como para generar la cantidad de radiación necesaria. A su ayuda acudió el físico ruso-americano Andrei Linde con otro tipo de hipótesis, basada también

en la cuántica de campos, pero que conseguía ajustar mejor los resultados de "su" expansión a lo que observamos en el universo.



Otra vez más el camino de expansión del Universo (Imagen: James M. Cline, IyC, fair use)

¿Cómo pudo producirse tamaña expansión? ¿Cómo se sostiene? Esto es un dilema que no sólo vive en los inicios: acompaña al Universo a lo largo de toda su existencia, un Universo que suponemos, e incluso hoy lo estamos midiendo, siempre ha estado expandiéndose. En el siguiente capítulo vamos a intentar avanzar entre las nieblas apoyándonos en las teorías inflacionarias que nos propusieron tan prestigiosos físicos. Son las que tenemos y que, además, nos permiten razonablemente pensar que tenemos una explicación coherente. Recordad que aún nos estaremos moviendo en escalas energéticas muy alejadas de las que manejan nuestros más avanzados instrumentos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 03:

1. No penséis que esto es una idea peregrina. Un equipo científico, en el que participa la NASA, está hoy en día determinando la grumosidad del Universo a través de las interferencias en la luz que llegan de los cuásares. Más información en este enlace: http://chandra.harvard.edu/press/15_releases/press_052815.html

2. Realmente la imagen más precisa que podemos asimilar al cuadro que nos dibuje las ondas gravitatorias no es una foto sino una pieza sinfónica. Estas ondas son un movimiento sinuoso del tejido espacio-temporal al igual que el sonido es un movimiento del medio que rellena el espacio. Las ondas gravitatorias no nos van a proporcionar una nueva imagen visual del Universo, más bien van a añadir a nuestras habilidades actuales a un nuevo sentido, el oído, con el que "escuchar" al Universo.
3. Las ecuaciones de Einstein en el caso cosmológico nos dicen que la aceleración de la expansión verifica esta ecuación. https://cuentos-cuanticos.com/2012/07/18/universo-inflacionario-parte-v-modelo-original-de-inflacion/
4. La fortaleza de la interacción gravitatoria es órdenes de magnitud superior a la energía de expansión, y por tanto es la que prevalece en los espacios próximos.
5. En la literatura de divulgación hay muchas alegorías que intentan visualizar este fenómeno de la expansión del tejido del Universo. Quizás una de las más afortunadas, al menos me lo parece a mí, es la que usa como ejemplo un pastel de pasas que metes al horno: cuando el pastel "sube" las pasas se separan, aunque ellas mismas no cambian. El pastel es el espacio tiempo y las pasas, la materia/energía.
6. Según la conocida ecuación de Einstein, $E = mc^2$
7. Llamados colectivamente bosones X y que son unas partículas elementales intermediadores de un tipo de fuerza predicha por la teoría de gran unificación.
8. Ya veremos qué son, aunque para el curioso urgente recomiendo la lectura de la serie del blog "*El Tamiz*", "*Esas maravillosasa partículas*". [https://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]
9. Que va desde t^{-43} segundos a t^{-35} segundos a partir del inicio.
10. Que por otro lado era lo que les sucedía también al resto de partículas existentes durante la época de la Gran Unificación.
11. Ya sabemos del capítulo anterior que el principio de incertidumbre de Heisenberg exige emparejar una gran energía con un efímero tiempo.
12. No están las correspondientes a los antibosones.
13. De Wikipedia: "*La simetría CP se basa en la composición de la simetría C y la simetría P. La simetría C o simetría de carga*

afirma que las leyes de la física serían las mismas si se pudiesen intercambiar las partículas con carga positiva con las de carga negativa. La simetría P o simetría de paridad dice que las leyes de la física permanecerían inalteradas bajo inversiones especulares, es decir, el universo se comportaría igual que su imagen en un espejo. La ***simetría CP*** *es el producto de ambas.*"

14. Un teraelectrónvoltio -TeV- es equivalente a 10^{12} electronvoltios. 10 TeV son, por lo tanto, solamente 10^4 GeV.

15. Hablaremos de todos estos procesos en capítulos posteriores.

16. Recordemos que son intermediarios de la interacción GUT, que acaba de desaparecer.

17. Así llamamos también, por ejemplo, al proceso por el que por enfriamiento el agua líquida pasa a ser agua sólida.

18. La constante cosmológica es ni más ni menos que una energía interna.

04: Inflando el Universo I

de 10^{-35} segundos a 10^{-32} segundos desde el inicio

En el capítulo anterior nos movimos por un suspiro temporal menor a 10^{-35} segundos, cuando el Universo era muy joven y también muy pequeño. Se encontraba en la vecindad del mundo de Planck, aunque mayor que él. Como ahí comentábamos, todo se reducía a un mundo de tamaño de un protón reducido a escala de 10^{-20}. En estas pequeñeces nos sentimos muy bien apoyados por la física cuántica de campos, que maneja lo que conocemos como campos relativistas.[1]



Un magnífico superfísico de los campos cuánticos: Richard Feynman, que co-recibió el premio Nobel de física en 1965 por el desarrollo de la electrodinámica cuántica (Wikimedia, dominio público)

Pero ¿qué es un campo relativista? Pues es una entidad física que permea todo el espacio y que sólo podemos conocer de su existencia por sus interrelaciones y sus excitaciones. Lo que en familia llamamos *interacciones* -fuerzas- *fundamentales* y *ondas-partículas*. Los campos relativistas no son como el resto de campos que precisan de un medio para ser,[2] sino que son físicamente reales y físicamente valiosos en el Universo, en el que gracias a sus ondas se transmite

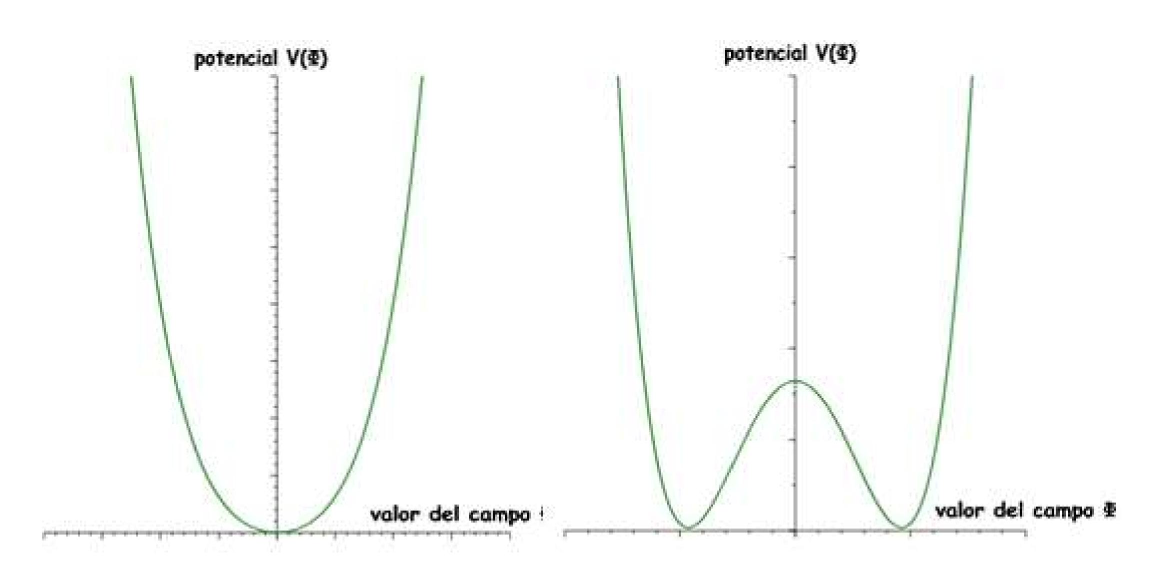
energía e información de un lado a otro, siendo así que las ondas de un campo pueden afectar a las de otro y pueden cambiar procesos que en su ausencia ocurrirían de otra manera. Los hay de muchos y diferentes tipos, al menos en el mundo de las matemáticas y la física más compleja.

El mero hecho de que el campo tenga un valor en un punto determinado significa que ahí hay un potencial, una capacidad que tiene el campo para realizar "algo". Pensemos como ejemplo en el campo gravitatorio, tomando arbitrariamente su referencia en la superficie de la Tierra: más arriba hay más potencial, más abajo hay menos potencial. Con este potencial, el campo gravitatorio puede mover una masa. De un punto con mayor potencial a un punto con menor potencial.

La energía potencial de un campo -o simplemente su potencial- viene definido de forma más general por la siguiente igualdad,[3] **siendo Φ el valor del campo Φ**



potencial V(Φ) = [una constante A x Φ^2] + [otra constante B x Φ^4]



Si representamos la curva que define la ecuación anterior, f[V(Φ), Φ],[4] tenemos que pensar que su forma dependerá del valor de las constantes A y B. Que en líneas generales será alguna de las imágenes anteriores: la de la izquierda, para valores del coeficiente A mayores que cero, y la de la derecha, para valores de A menores que cero.

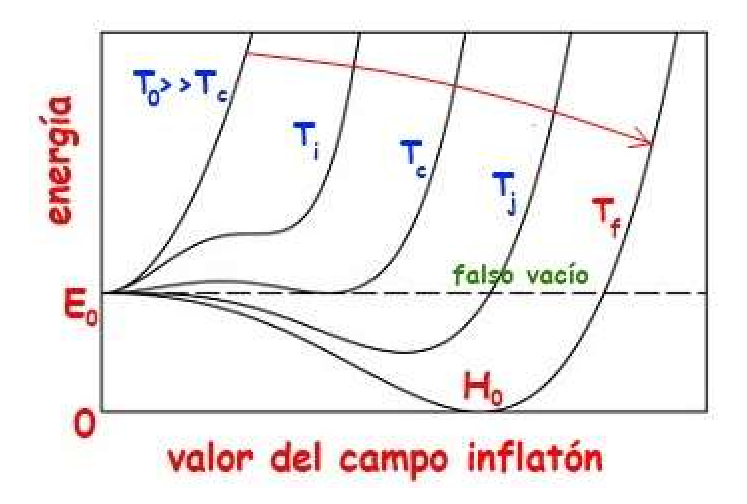
Esta curva nos dice cómo la energía potencial V(Φ) del campo puede tomar un valor u otro de acuerdo al valor que tome el campo. Este valor Φ es indicativo del estado particular del propio campo, sin que se precise el conocimiento de su distribución en el espacio, que puede ser muy variable, o en el tiempo. En relación a este último, como cosmológicamente se considera al universo homogéneo e isótropo, habrá que convenir que la variación temporal del campo será la misma en todos sus puntos.[5] Dado el necesario posicionamiento de los sistemas físicos en la "arquitectura" de mínima energía,[6] debemos convenir que el punto que defina el estado normal del campo es el que representan los mínimos de las anteriores curvas. Un campo cero en el primer caso, o un campo distinto de cero en el segundo.

Ésta precisamente es la foto del carnet de identidad del campo que creemos fue el responsable de la expansión primordial de nuestro Universo. Una ecuación de cuarto grado, representada en la figura siguiente, que correlaciona el valor del campo, en el eje horizontal, con el valor de su potencial -energía- en el eje vertical. Además, en distintos momentos relativos al tiempo -temperatura-[7]**.** Vamos a llamar a este campo escalar el **campo inflatón**. Ya os podéis imaginar el por qué.

Habíamos visto en el capítulo anterior que gracias a Einstein -y muy a pesar de sus iniciales ideas personales-[8] sabemos explicar por qué nuestro Universo se expande y que a lo largo de su historia lo pudo hacer de una u otra manera dependiendo de la distribución de energías, materias y presiones en su estructura espacio-temporal. En los momentos inaugurales del universo, el campo inflatón definiría esta distribución. Veamos cómo lo hacía. A medida que el universo se expandía se iba enfriando, por lo que el potencial del campo inflatón evolucionaba con el tiempo, de forma que su curva de estado cambiaba, dibujando una especie de progresivo aleteo descendente tal como hemos tratado de representar en la gráfica que sigue.

Durante un cierto tiempo -realmente menos que un suspiro-, antes de que el Universo llegara a la temperatura crítica Tc, el campo inflatón buscó lógicamente su posición de mínima energía, por lo que en todos sus puntos y en todo momento ésta tomaba el valor E0. Es decir, el

campo inflatón estaba manteniendo en el sistema en expansión del Universo una energía prácticamente constante, circunstancia que hacía que, a pesar de que incrementara su volumen, la densidad de energía se mantuviera constante en el tiempo -lo digo de forma muy burda pero entendible-, al estar nuestro campo inflatón inyectando su E0 a todo "metro cúbico" nuevo de Universo. Lo cual es sorprendente si pensamos que lo normal es que, al expandirse un sistema aislado, al aumentar su volumen sin que pase nada más, la densidad de energía disminuye.



Evolución de la curva del potencial de campo inflatón con el tiempo (la flecha roja es a flecha del tiempo). Las ***T*** *son las temperaturas del Universo en cada momento.*

Veamos cómo juega esto desde un punto de vista termodinámico. El Universo se estaba expandiendo, lo cual debería conllevar una variación de su energía total. Al ser por definición un sistema cerrado[9] no podía haber ninguna transmisión de calor fuera de él o desde fuera a su interior. A eso se lo conoce termodinámicamente como un proceso adiabático que tiene la siguiente expresión matemática:

Variación de Energía = – Presión x variación de Volumen

Como hemos dicho, este proceso estaba sucediendo en un momento en el que el campo inflatón se encontraba prácticamente fijo en un mínimo de energía, que era constante y de valor E_0, o quizás oscilando muy lentamente en un entorno muy cercano al mínimo de su ecuación de estado. Dada la isotropía y homogeneidad del Universo, la

expansión material del espacio-tiempo no afectaba a los valores del campo, siendo su único efecto el que el campo inflatón extendiese localmente su influencia arrastrado por la propia expansión del tejido soporte. Podemos considerar, por tanto, que en aquellos momentos iniciales se estaba produciendo un incremento total de energía en el universo del siguiente calibre:

Variación de Energía del Universo = Densidad de energía en el campo inflatón (cte) x variación de Volumen

Evidentemente las dos expresiones anteriores tienen que ser la misma cosa. Por lo que si las igualamos concluiremos que

– Presión = Densidad de energía en el campo inflatón (cte)

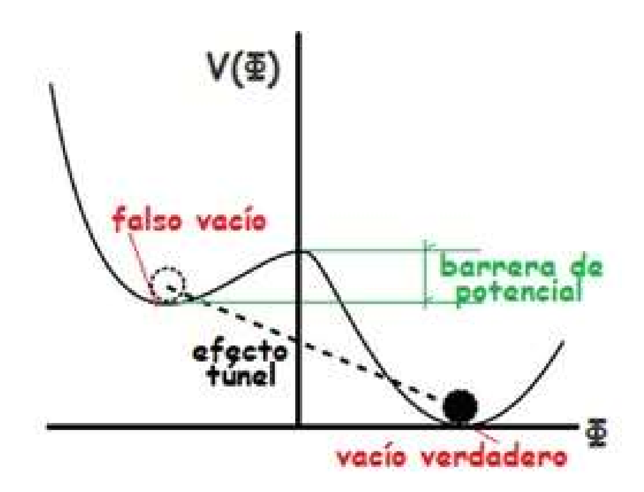
o lo que es lo mismo al cambiar signos en ambos lados de la igualdad

Presión = – Densidad de energía en el campo inflatón (cte)

Como la densidad de energía del campo inflatón correspondiente al valor **E_0** es positiva, vemos con sorpresa que **en el proceso de expansión tenía que estar presente una presión negativa**. Recordemos esta circunstancia.

Si volvemos a fijarnos en la figura anterior, la que dibujaba la dinámica de la curva de estado del campo inflatón a medida que pasaba el tiempo y el universo se enfriaba, podemos apreciar cómo en un cierto momento a lo largo de esa dinámica temporal se va abriendo para el campo inflatón la posibilidad de nuevos mínimos energéticos. Una situación termodinámicamente mucho más atractiva para él, que se va a ver impelido a evolucionar desde el mínimo inicial (E_0) hasta uno nuevo, inferior al anterior, en donde el valor global del campo ya va a ser distinto de cero (H_0). Mientras el campo inflatón se encontraba con valor cero en su primer mínimo, no tenía capacidad para generar partículas físicas "estables" -aunque sí un trasiego de las virtuales, que aparecían y desaparecían- y por eso a este estado lo podemos categorizar como un estado denominado de ***falso vacío***.[10] En el momento en que "cayó" al nuevo mínimo en donde el campo SÍ tenía un valor, aunque con una mínima energía, entonces sí alcanzó la posibilidad de dar a luz, además de a las partículas virtuales, a

partículas “estables”. Por contraposición, a este nuevo estado se le conoce como de ***verdadero vacío***. La tendencia a la caída de un vacío al otro es algo semejante al agua de una presa, que al romperse pasa de una embalsada tranquilidad -la falsa- a otra embalsada tranquilidad de menor energía -la verdadera-, cuando alcanza el mar. En el proceso transforma su energía potencial inicial en energía de movimiento, lo cual introduce una sutil pista para lo que vendrá en esta serie.



Para que el campo pase del falso vacío al verdadero tiene un pequeño problema: ha de superar una barrera de potencial. Pero la cuántica nos da la solución al decirnos que lo consigue gracias al efecto túnel.[11]

En los primeros momentos del tránsito de un vacío al otro, cuando el valor del campo aún estaba muy próximo a cero, es cuando el campo inflatón estaría favoreciendo el embalsamiento de energía en el Universo en expansión. Y ya sabemos que esto generaba en su tejido una presión negativa. Usando este dato podemos intentar resolver para nuestro campo la ecuación de Einstein ajustada a un universo plano como el nuestro, que es de tal calibre:[12]

ä(t) = aceleración del cambio de escala = – K . (densidad de energía) . a(t) = – K . (-presión) . a(t) = + K . (presión) . a(t)

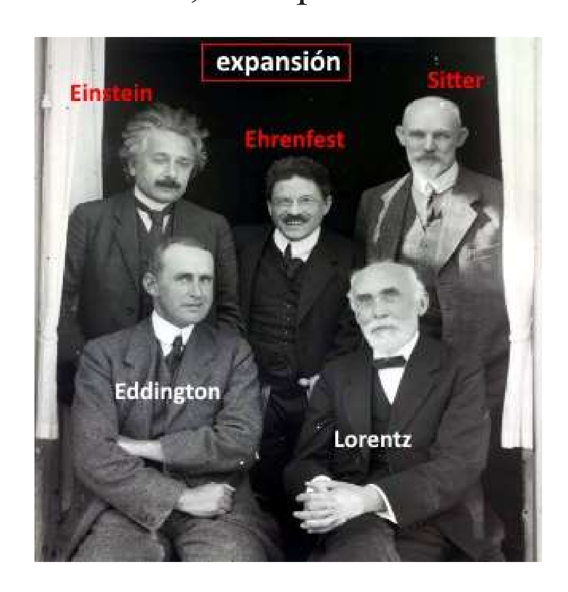
Tras unos sencillos cálculos, obtenemos para el factor de escala de la expansión a(t) algo así como:

$$\mathbf{a(t) = c^{\text{raíz cuadrada } (2\,K\,t)}}$$

lo cual es una ***relación exponencial*** entre el factor de crecimiento y el tiempo, cuya paternidad debemos achacar a que la presión negativa del inflatón nos ha cambiado radicalmente el alma del proceso, al haberse transmutado un signo menos por uno más. La existencia de un campo inflatón estaba introduciendo una derivada que solucionaba muchos de los problemas que los cosmólogos no entendían si la expansión del universo hubiera sido menos potente, que era lo que a fin de cuentas decía la teoría primitiva del Big Bang. Entre otras cosas incomprensibles, la de el porqué de la homogeneidad de la información que observamos en el Universo.

Todo lo anterior fue la base de la propuesta de la **teoría inflacionaria** -conceptuada como la "**antigua**"- del físico Alan H. Guth. A medida que el universo primigenio se expandía y enfriaba, se vio atrapado en un estado inestable de falso vacío, que técnicamente se le conoce como superenfriado. Para decirlo de forma sencilla, más enfriado de lo que toca para el estado físico que se observa. Éste es el estado en el que se puede encontrar a veces el agua en proceso de congelación, que no acaba de solidificarse a pesar de estar a una temperatura muy por debajo de 0ºC. Su estado es líquido pero altamente inestable, de forma que cualquier alteración, golpe, movimiento o suciedad en su interior, le provoca un colapso progresivo hacia el estado de congelado. Las semillas iniciadoras se congelan, siguiéndolas el resto del agua en fase líquida. Precisamente esto es lo que le debió pasar al campo inflatón de Guth, que se "derrumbó" desde la posición de falso vacío hacia el de verdadero vacío a través de un proceso de "tunelaje" cuántico por el que se iban formando espontáneamente burbujas de vacío verdadero en el mar de falso vacío del Universo, burbujas que rápidamente se aquietaban mientras el resto del espacio-tiempo seguía su expansión exponencial. Al final, todo llegaba a ser un mundo de burbujas fusionadas en un espacio superexpandido. Se suponía que al juntarse las burbujas, en el choque, se debían "alumbrar" las partículas de radiación y de materia que hoy observamos. Pero los cálculos decían que la expansión era tan rápida que nunca llegaban a encontrarse las burbujas. La idea general de Guth era buena, pero tampoco nos resolvía algún "detalle". De forma que tuvimos que buscar nuevas teorías que siguieran estando enmarcadas dentro de la general de una expansión exponencial.

Aquí entró la intuición del físico teórico ruso-americano Andréi Linde, que perfeccionó la idea inicial de la inflación propuesta por Alan H. Guth. Su punto de partida sería la hipótesis de que hubiera una proporcionalidad entre el campo escalar inflatón y su potencial, su energía. Se trataba de una propuesta que no requería de efectos gravitatorios cuánticos, de transiciones de fase, de un super-enfriamiento o de un super-calentamiento inicial. Y a pesar de ello el Universo, se expandía aún a mayor velocidad.





Algunos genios de la cosmología. La "vieja escuela" expansiva (1923) y la "nueva escuela" inflacionaria (2014) (Izquierda, wikimedia, CC BY-SA 3.0 y derecha, Camille M. Carlisle / Sky & Telescope, fair use)

Después de la presentación de los viejos y "jóvenes" monstruos de la cosmología… Einstein, Sitter, Lorentz… Guth, Linde… ¡y no nos olvidamos de los pioneros, Alexander Friedmann y Georges Lemaître!,[13] creo que es el momento adecuado para proponer un respetuoso descanso en honor de gente tan sagaz.

Aún quedan bastantes cosas que decir sobre el hecho de la inflación. Historia que veremos en el siguiente capítulo.

NOTAS CAPÍTULO 04:

1. Que son los que intervienen en la mayoría de los fenómenos físicos de esta historia: electromagnético, gravitatorio, electrónico, …
2. Aunque no tenemos que confundir ambas entidades: el campo describe y caracteriza una de las muchas propiedades relevantes del medio.
3. Una mayor información en el siguiente enlace:

   [https://cuentos-cuanticos.com/2014/06/26/el-mecanismo-de-higgs-para-estudiantes-de-bachillerat-i/]

4. Que a fin de cuentas es una ecuación de cuarto grado que podemos aprender a resolver en este enlace a Wikipedia:

   [https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_cuarto_grado]

5. Con ello se simplifica en gran medida los cálculos de las ecuaciones cosmológicas que quedan independientes de (x,y,z). Fue el "*truqui*" que explotó el matemático y meteorólogo ruso Alexander Friedmann, el primero que resolvió las ecuaciones de Eisntein.
6. De acuerdo al principio termodinámico de mínima energía. Para saber más podéis consultar este enlace:

   [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_energ%C3%ADa_m%C3%ADnima]

7. La temperatura es proporcional al factor de escala del Universo. Y el factor de escala varía con el tiempo según estas sencillas igualdades: en un mundo en que domina la materia, la correlación es $a = Kt^{2/3,}$ y si es la energía quién domina, $A= Kt^{1/2}$. Para más información ver:

   [https://cuentos-cuanticos.com/2011/11/12/en-un-universo-hecho-de-materia/]

[https://cuentos-cuanticos.com/2011/11/12/en-un-universo-hecho-de-radiacion/]

8. Al ver Einstein que de sus ecuaciones de la relatividad surgía un universo que no era estático, propuso una modificación de las mismas que incorporaba una constante cosmológica que anulaba la expansión. Cuando con posterioridad fue evidente que el Universo se expandía, el propio Einstein calificó su decisión como "el peor error de su carrera".

9. Fuera del Universo no hay nada. Y nada es *nada*.

10. En cuántica, **vacío** es el nombre que se le da al estado de un sistema físico que está en su mínimo de energía.

11. La cuántica nos dice que a la vez hay una cierta probabilidad, quizás mínima, de que el campo se encuentre en el vacío verdadero y otra probabilidad de que se encuentre en el falso. Luego el "salto" de la barrera es posible.

12. Ya hablamos de ella Enel capítulo anterior.

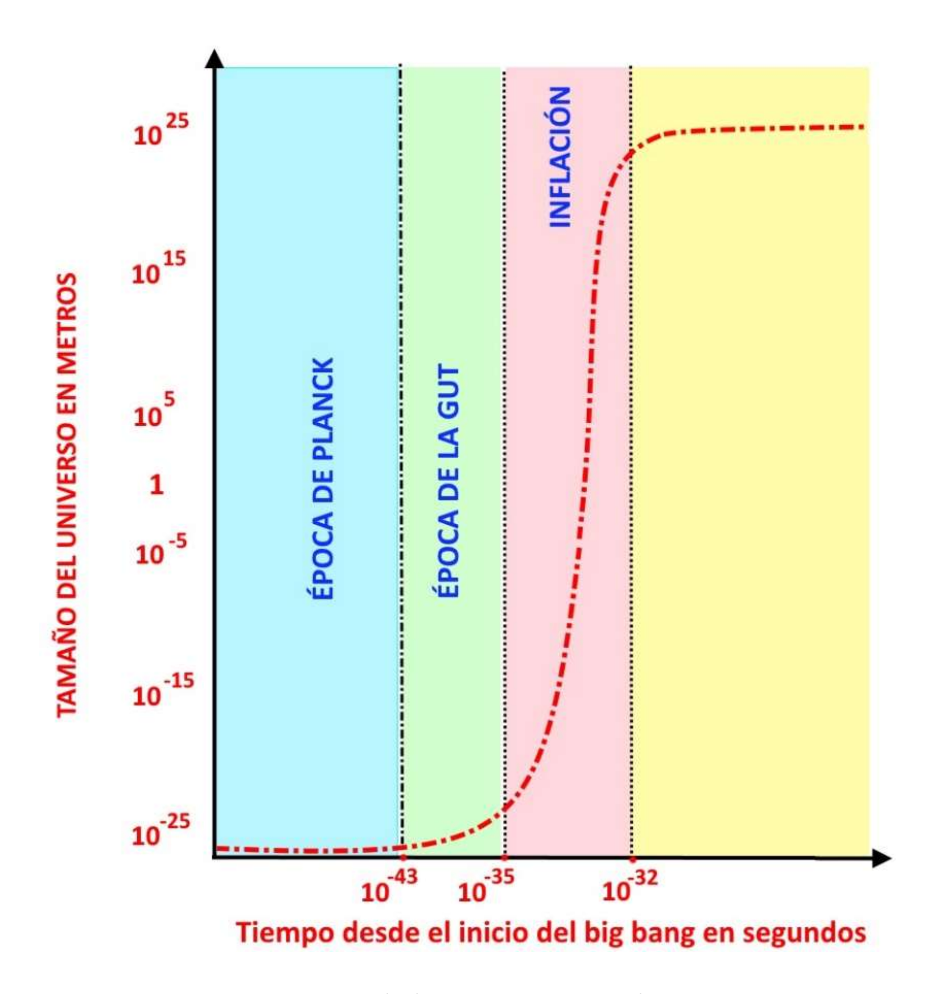
13. Friedman fue quién descubrió una de las primeras soluciones cosmológicas de las ecuaciones de la relatividad general, la correspondiente a un universo en expansión; mientras que Lemaître fue el padre de la idea original de lo que luego se conocería como el Big Bang, que el mismo llamó "hipótesis del huevo cósmico".

05: Inflando el Universo II

de 10^{-35} segundos a 10^{-32} segundos desde el inicio

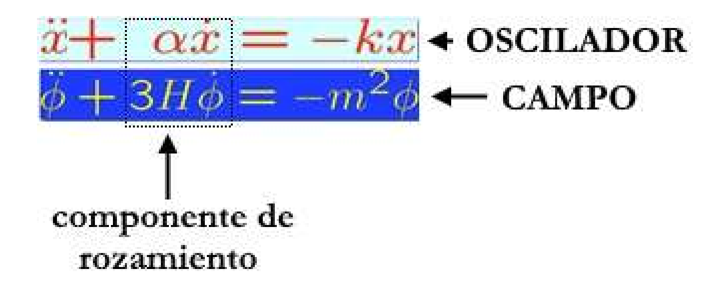
Recuperamos en este nuevo capítulo el hilo del relato interrumpido al final del anterior en el que nos habíamos dedicado a analizar qué es lo que le pasó a nuestro biografiado en el momento más o menos t^{-35} segundos. Y lo que le pasó, o pensamos que le pasó, es que su tejido "corporal" espacio-temporal se vio compelido a un exagerado y rápido "engorde", que conocemos como una inflación exponencial, gracias al capricho del campo inflatón que optó por mudarse de lugar aprovechando el efecto de tunelaje cuántico. Comentamos también cómo dentro del mundillo de la física había mentes brillantes que estaban estudiando la expansión del Universo, aunque sus conclusiones no satisfacían plenamente lo que realmente parecían observar al levantar la vista al cielo. Alan Guth intentó romper el *impasse* con una novedosa idea por la que postulaba un proceso de expansión inflacionaria -de velocidad incluso mayor que la de la luz- para el Universo.

Decíamos también que… "*la idea general de Guth era buena, pero tampoco nos resolvía algún "detalle". De forma que tuvimos que buscar nuevas teorías que siguieran estando enmarcadas dentro de la general de una expansión exponencial. Aquí entró la intuición del físico teórico ruso-americano Andréi Linde que perfeccionó la idea inicial de la inflación propuesta por Allan H. Guth. Su punto de partida sería la hipótesis de que hubiera una proporcionalidad entre el campo escalar inflatón y su potencial, su energía. Se trataba de una propuesta que no requería de efectos gravitatorios cuánticos, de transiciones de fase, de un super-enfriamiento o de un super-calentamiento inicial. Y, a pesar de ello, el Universo se expandía aún a mayor velocidad*".



Los primeros momentos del recién nacido Universo, que en el intervalo temporal entre t^{-35} y t^{-32} segundos desde el inicio duplicó su tamaño unas cien veces.

Antes de continuar, y para entender mejor el razonamiento de Linde, vamos a introducir el concepto de rozamiento en el análisis teórico del campo inflatón (y no sólo del inflatón). Los campos vibran en ondas, cuyas ecuaciones son asimilables a las de los osciladores armónicos (péndulo, muelle…)[1] de forma que, al igual que les pasa a los osciladores, parece que los campos pueden verse afectados por algo parecido al rozamiento. Se ve claramente si comparamos las ecuaciones que definen ambos sistemas -al inicio dela página siguiente-: en los dos aparece un sumando adicional que no existe en las ecuaciones para un sistema sin rozamiento, sumando que es proporcional en un caso -oscilador-, a la derivada primera de la elongación, y en el segundo -campo cuántico-, a la derivada primera del valor del campo, lo que permite ser intuido como que hay algo que debe estar afectando a la velocidad de sus cambios.



Si nos atenemos a la ecuación relativa al campo -la segunda- podemos imaginar al parámetro **H** como el "factor de rozamiento" del campo al compararlo con el parámetro **α,** que sí es el factor de rozamiento en el oscilador. A **H** se le conoce como la constante de Hubble[2] y tiene que ver con las características de crecimiento dinámico del tejido espacio-tiempo del universo. El concepto de "rozamiento" enriqueció la propuesta inflacionaria de Linde, conocida como la "**nueva inflación**".

Como ya hemos dicho un poco más arriba, el punto de partida sería la *hipótesis de que hubiera un campo en el que se diera una proporcionalidad entre su valor y su potencial, su energía*. A mayor campo mayor potencial. Esta idea la aplicó Linde a las ecuaciones de la relatividad de Einstein, las cuales le permitieron deducir la siguiente correlación entre la constante de Hubble y el valor del campo:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{m^2}{6}\phi^2$$

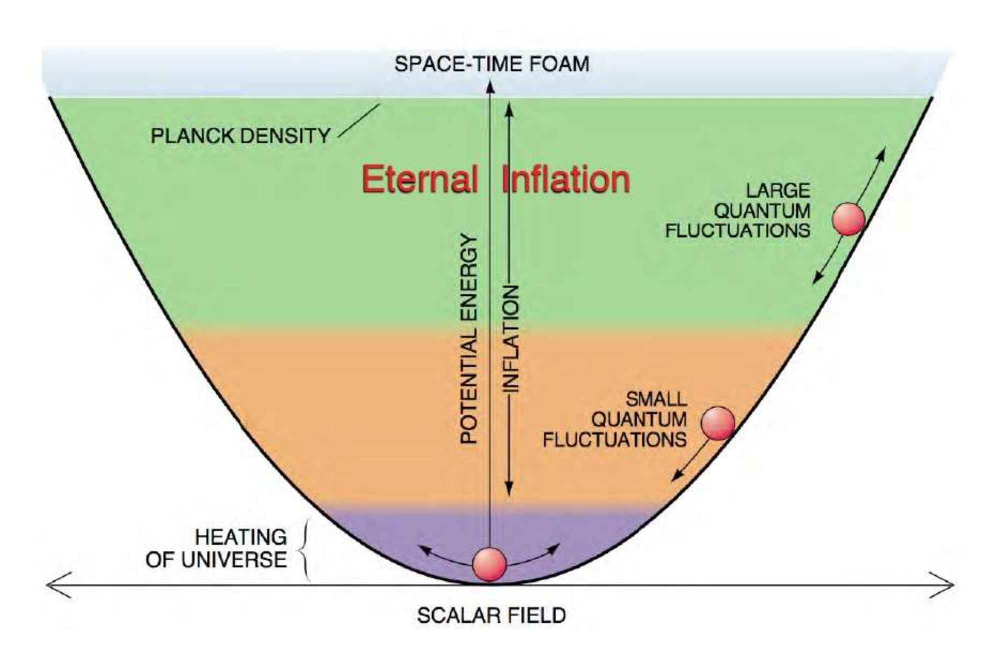
Si suponemos que el valor Φ del campo es grande, también lo será el de H, por lo que habrá que pensar que hay mayor "rozamiento", mayor resistencia al cambio del valor del campo Φ. Lo que nos lleva de la mano, sin cometer un gran error, a que en estas circunstancias su valor lo podamos considerar constante. Si esto es así, la resolución de la primera igualdad de la anterior ecuación es muy sencilla y nos dice que **el factor de escala "a" es una función exponencial de H**, como expresa la igualdad de más abajo. A mayor valor del campo Φ mayor valor de H y, por tanto, mayor rapidez de crecimiento del universo. **Aumenta la velocidad de crecimiento del universo y disminuye la velocidad de variación del campo** -recordemos que

para el campo, H es equivalente a un rozamiento- en su búsqueda de mínimos energéticos[3].

Factor de crecimiento del universo $a(t) = e^{Ht}$

Lo cual dibuja una expansión mucho más brutal en el tiempo que la que se postulaba en la teoría de inflación de Guth. Un exponente directo del tiempo frente a un exponente de la raíz cuadrada del tiempo.

Ante esta circunstancia física, Linde se planteó la siguiente posibilidad: ¿Y si eso es lo que realmente pasó en los inicios, cuando el campo inflatón comenzaba su excursión desde el falso mínimo al mínimo energético verdadero? Con ello había encontrado un posible proceso -teórico- del que se deducía una gran inflación experimentada por el Universo a partir del tiempo $t=10^{-35}$ segundos, con la que solucionaba algunas de las nieblas que aún dejaba la teoría de Guth. De una forma muy intuitiva lo explica él mismo mediante el siguiente diagrama:



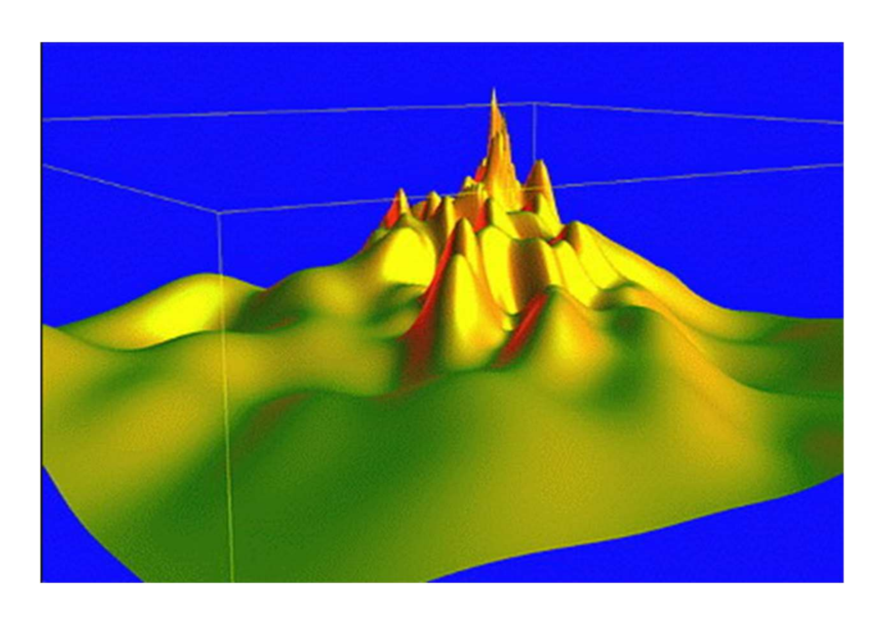
Esquema de las características y comportamiento del campo inflatón según Andréi Linde[4] (Imagen: Andréi Linde, fair use)

A continuación voy a exponer lo que podemos deducir en la imagen anterior de la función de estado del campo inflatón, tal como lo propone Linde. La capa más alta del diagrama discurre en un

Universo espuma (space-time foam). A partir de ahí al campo inflatón, representado por una bolita roja, no le queda más remedio que acomodar su valor a la temperatura del momento, progresivamente más fría. Lo cual nos hace imaginar algo así como que la bola "inflatona" "cae" por la pendiente de la parábola. Ya sabemos por lo dicho en el capítulo anterior que es efecto de las incertidumbres cuánticas y su efecto túnel. De acuerdo a esta curva y siguiendo el proceso temporal físico a lo largo de esta "caída", la evolución del universo parece llevarse a cabo a través de tres episodios separados, aunque secuenciales en el tiempo:

(a) ***Saliendo del estado de universo espuma***. En sus tramos más energéticos[5] el potencial disminuía muy lentamente, como si hubiera un gran rozamiento teórico, de forma que al campo inflatón le costaba más el deslizarse cuesta abajo en su excursión hacia el mínimo del verdadero vacío. Esto le hizo permanecer durante mucho tiempo en este estado casi estacionario, sin que variase mucho su valor de campo y de potencial. Como ya hemos comentado unos párrafos más arriba, **eso se tradujo en una gran constante de Hubble y**, por tanto, **en una expansión exponencial del Universo a lo largo de todo este periodo**. Se demuestra matemáticamente que, a la vez, se estaban produciendo unas fluctuaciones cuánticas de alto nivel.[6] Pero esto es harina de otro costal. La realidad que ahora nos interesa es que mientras se está produciendo este periodo de expansión exponencial característico de la inflación, se está produciendo un colosal "embalsamiento" de energía en el tejido de un campo[7] que está incrementando su volumen de forma exponencial mientras se mueve en unos máximos de potencial que lo van a ir permeando.

(b) Tras la zona inicial de descenso, en donde el efecto de la presión negativa -hablaremos de ello más adelante- y la expansión exponencial es mayor, ***entramos en la zona naranja*** de la curva de Linde. El potencial empieza a cambiar mucho más rápidamente, siendo la transición a la zona morada muy corta, transición a lo largo de la cual se generan en nuestro Universo en expansión fluctuaciones cuánticas más pequeñas. Su distribución espacial va a ser el patrón de distribución de masa en el futuro del mismo. De esto hablaremos también en otro capítulo.



Generación de fluctuaciones cuánticas. El borboteo es incesante cambiando continuamente el paisaje de picos (Imagen, fair use)

(c) ***Fase de recalentamiento***. Por último, al acabarse la inflación exponencial, el inflatón se adentra en la zona de reposo, acunándose alrededor del punto de mínima energía. En estos momentos creemos que aparece una nueva generación de campos y el universo pasa de un estado vacío, oscuro y frío -con relación a lo que venía después-, a todo lo contrario. La inmensa energía potencial embalsada gracias al campo inflatón durante la expansión se transforma en eso, en cantidades ingentes de partículas de masas del orden de hasta 10^{14} GeV y radiación del mismo orden energético, alcanzando la temperatura los 10^{29}K. El universo había desembalsado su energía en el momento 10^{-32} segundos contados desde el inicio, quedando sólo el impulso inicial para seguir con el proceso expansivo, ahora a un ritmo mucho menor. Y así hasta el día de hoy, que sigue en la labor.

De esta materia y energía generada inicialmente en la última fase de recalentamiento hablaremos en un capítulo posterior, cuando comentemos lo que se cree que pueda ser la actual distribución cuantitativa de energía en el universo, en sus diversas manifestaciones. Adelantamos una pincelada al respecto: una pequeña parte está en forma de materia visible, cinco veces más en forma de materia oscura y el resto, un 70%, en forma de esta energía oscura que hace expandirse al tejido espacio-temporal del Universo. Y no tenemos ni idea de lo que pueda ser esta energía oscura. Quizás alguna propiedad interna del sistema en forma de presión negativa.

De igual calibre que la que provocó la gran inflación. Explico esto último.

Necesitamos una fuerza impulsora. Y sabemos por lo que dice la relatividad general que al menos hay una, la gravedad, resultado de una deformación del espacio-tiempo, que provoca algo que se aprecia como un impulso-deformación, en este caso atractivo. Según la teoría relativista, esta deformación gravitatoria no sólo la produce la energía, o su equivalente, la masa, sino también la presión. La presión no sólo realiza una fuerza de empuje por ella misma, sino que también puede deformar el espacio-tiempo generando un efecto gravitatorio. Dos caras de una moneda.

Si consideramos a la presión en su forma más cotidiana e intuitiva - la que nos afecta en nuestras experiencias- puede ser de tipo positivo, cuando sentimos su *empuje*, o negativa, cuando sentimos una *tensión* que atrae. Nos percatamos de este último tipo de presión, por ejemplo, cuando mantenemos a un muelle estirado entre las dos manos, ya que en su estructura material lleva implícita una energía de "aproximación".

Vista la presión *desde esta perspectiva, se trata de una energía no gravitacional* que solamente mueven substancias en torno a un espacio interior sin cambiar el espacio en sí. Sin embargo, según las ecuaciones de la relatividad, la influencia que ejercen sobre la gravedad curiosamente SÍ afecta al espacio interior, sorprendentemente en sentido contrario a lo intuitivo. Así que la presión positiva de un sistema genera sobre sus estructuras un efecto gravitatorio de atracción, mientras que la tensión, o **presión negativa genera en sus estructuras una gravedad negativa** o de repulsión.

Ahí encontramos una causa de la fuerza expansiva. En una presión negativa. Algunos prefieren llamarla "smooth tension" o "tensión lisa", por tratarse de una tensión de bajo valor que además está distribuida uniformemente por todo el tejido del Universo. Ni más ni menos que lo que decíamos de la presión negativa del campo inflatón en el capítulo anterior. Una circunstancia física que nos permite

enlazar en la realidad del Universo *la causa*, una "smooth tension", con *el efecto*, su expansión.

Sí, esto es lo que se cree que sucedió entre $t=10^{-35}$ segundos desde el hipotético inicio del tiempo, fijado en el momento de la ficción matemática que llamamos singularidad inicial, y el momento $t=10^{-32}$ segundos. Pero lo más sorprendente fue el ritmo: cada 10^{-34} segundos el Universo doblaba su escala, es decir, aproximadamente desde el momento 10^{-35} segundos al 10^{-32} segundos dobló su tamaño ¡100 veces! ¡Un crecimiento superior a 10^{30} ($\sim 2^{100}$)! ¡Desde 10^{-20} veces el tamaño de un protón hasta el tamaño de una naranja de 10 centímetros! ¡y todo en menos de 10^{-32} segundos![8] La luz tarda 10^{22} veces más en recorrer el tamaño de esta expansión. Y esto no va en contra de que nada puede viajar más deprisa que el límite que impone el valor de la velocidad de la luz en el vacío, 300.000 km/seg. Simplemente lo que sucede es que ha dado de sí el tejido espacio-temporal que creció a velocidades de vértigo.

Para completar, y antes de terminar el capítulo, creo que va a ser ilustrativo el responder una última pregunta. La masa -energía- de Planck, la del teórico micro-universo inicial, era de unos 10^{-5} gramos, con una densidad de 10^{94} gramos por centímetro cúbico. Hoy en día la energía total de la radiación observada en el Universo es equivalente a 10^{53} gramos. ¿De dónde ha salido toda la energía -materia y radiación- que vemos en el Universo?

Como desde la época de Planck esta radiación se ha enfriado 10^{32} veces, la energía que hoy vemos exigiría que en el momento de Planck hubiera una de al menos 10^{85} gramos ($10^{32}x10^{53}$) ¡pero sólo teníamos 10^{-5} gramos en nuestra burbuja inicial! La solución al dilema "imposible" la obtenemos de la inflación exponencial, que tendió el puente que enlaza ambas energías. Si en la escala de Planck había una energía de 10^{-5} gramos y ésta es la que fija el valor del campo escalar inflatón[9] que permaneció casi constante durante la expansión exponencial de factor lineal 10^{30}, es fácil pensar que a lo largo de este proceso dicho campo inflatón embalsara energía hasta el orden de 10^{-5} x 10^{30} x 10^{30} x 10^{30} = 10^{85} gramos, para posteriormente y durante la fase del **recalentamiento** transformarla en materia y radiación. ¿Casualidad en la coincidencia de los

números? Seguramente lo que pasó no fuera exactamente así, pero me quedo con el matiz, y éste me dice que la teoría de la inflación es bastante inteligente.

Hasta aquí con la teoría de la fase inflacionaria del Universo. En el capítulo siguiente nos adentraremos en algunos aspectos cosmológicos que la inflación nos ha ayudado a entender mejor. O eso creemos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 05:

1. Para una mayor comprensión recomiendo seguir la serie "*Fields and Their Particles: With Math*" del blog "Of particular significance".

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/]

2. Edwin Hubble descubrió que las galaxias en el Universo se separan unas de otras, a mayor velocidad cuanto más alejadas están unas de otras. Actualmente una galaxia situada a una distancia de 3,26 millones de años luz se alejaría de nosotros a una velocidad de unos 70 km/s. Al factor de proporción entre la velocidad de desplazamiento y la distancia se le conoce como*constante de Hubble*.
3. Ver el siguiente enlace al extracto de una conferencia de Andréi Linde hablando del tema.

   [http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/lectures/Biermann_07/LindeLecturesMunich1.pdf]

   Con un poco más de detalle, en el siguiente enlace encontraréis la transcripción de la conferencia, aunque en ruso. Pero para esto está Google translator.

   [http://apocalypse-2012.com/linde/linde1.html]

4. OJO, no pensemos esta curva como inmersa en un campo gravitatorio, aquí no cae nada. Simplemente hay que imaginar como si la parte alta fuera más "pegajosa", realmente que tiene más rozamiento, y por tanto inflatón permanece deslizando por esa zona alta un buen tiempo.

5. En la parte alta de la curva.

6. Para entendernos con lo último, esto se traduce en que en determinadas zonas del tejido espuma espacio-temporal de nuestro universo en expansión quedaría una energía potencial capaz de hacer renacer el proceso, creando a partir de las fluctuaciones cuánticas de alto nivel un nuevo universo. En el primer enlace de la nota 3 encontraréis la presentación resumen de una conferencia de Linde sobre el tema.

7. Me atrevo a definir la dualidad "espacio-tiempo + inflatón" también como un campo cuántico.

8. La alegoría de la naranja está extraída del libro de John Gribbin "*Biografía del Universo*", edición Drakontos Bolsillo 2011, página 72, aunque allí habla de un pomelo. De la misma publicación sale el dato del factor de inflación de 10^{30} aunque en esto hay muchas opiniones, incluso 10^{50} como proponen Eric Chaisson y Steve McMillan en su libro "*Astronomy today*".

9. En el texto del capítulo anterior la habíamos concretado en el parámetro E_0, energía del campo inflatón en el punto de falso vacío.

06: ¡Qué grande es la inflación!

t = 10^{-32} segundos

Salíamos del capítulo anterior en un momento en que el Universo había sido sometido a un **estiramiento** brutal de piel y a un **recalentamiento** que le dejó muy excitado. Esto último sucedía más o menos a los 10^{-32} segundos desde el origen teórico de nuestro tiempo en el centro del mundo de Planck. Recordemos una frase allí escrita: "*Por último, al acabarse la inflación exponencial, el* -campo-*inflatón se adentra en la zona de reposo, acunándose alrededor del punto de mínima energía. En estos momentos creemos que aparece una nueva generación de campos y el universo pasa de un estado vacío, oscuro y frío, a todo lo contrario. La inmensa energía potencial embalsada durante la expansión se transforma en eso, en partículas y radiación, incrementándose la temperatura hasta los* 10^{29}*K*".

La energía positiva de toda la materia que se acababa de crear durante la fase de recalentamiento del universo se balanceó con exactitud con la energía negativa de toda la gravedad del universo. Tal como dijo Alan Guth, el cosmólogo que visionó el proceso de expansión inflacionaria: "*Toda la materia más toda la gravedad en el universo observable es igual a cero. Por eso el Universo pudo surgir de la nada, porque es, básicamente, nada".*

Nota general para todo lo que sigue donde se menciona un universo observable:

Como "universo observable" entendemos a una región parcial del Universo total, una esfera con nosotros de observadores en el centro, en la que la luz emitida por los puntos frontera más exteriores ha tenido tiempo de llegar hasta el centro de la esfera. Lo que quiere decir que estos puntos frontera se encuentran a una distancia de nosotros en años-luz igual a la edad del Universo, 13.800 millones

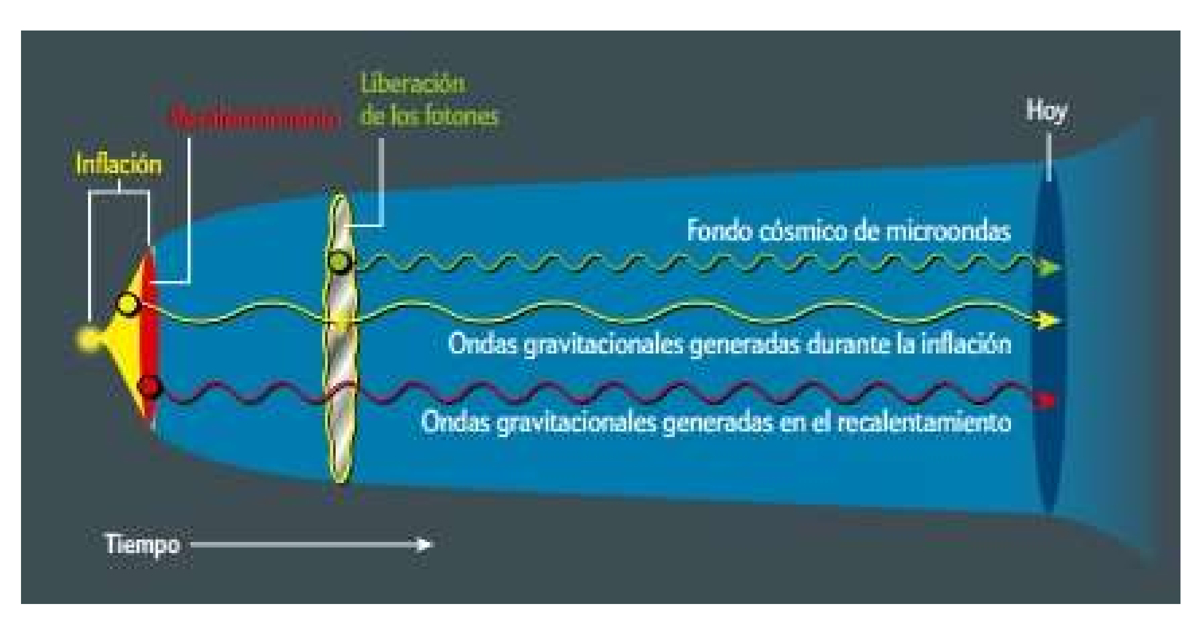
de años-luz que, ampliados por el efecto de la expansión, equivale a unos 0,5×10²⁴ kilómetros de radio de la esfera observable. El resto del Universo, que se postula en algunas teorías como finito y cerrado y en otras como infinito -o casi infinito- en el espacio pero finito en el tiempo, es inalcanzable.[1]

En el momento de alcanzar su estado de mínima energía, el campo inflatón fue capaz de interactuar con los nuevos campos surgidos en este momento de cambio de estado para nuestro Universo. Campos correspondientes a nuevas partículas y fuerzas; algunas serían como las actuales, otras extrañas o desconocidas para nosotros.[2] El campo inflatón inducía estados de vibración en los nuevos personajes, quizás mediante la intermediación de una partícula que podríamos llamar también inflatón, en un mundo de altísimas energías que rondaban los 10^{24} eV, muy alejadas de las que manejan nuestras capacidades tecnológicas.[3] Es decir, este momento y estas partículas son aún inobservables para nosotros.

Diversas resoluciones teóricas del fenómeno de **recalentamiento** parecen indicar que el proceso pudo iniciarse a partir de la formación de burbujas de energía en determinadas regiones del espacio, que serían ondas de materia muy localizadas y con una tremenda energía cinética. A velocidad próxima a la de la luz, estas burbujas chocarían, fragmentándose en otras más pequeñas y con unas longitudes de onda menores. Con el paso del tiempo, y siguiendo este proceso, las burbujas iniciales se habrían extendido por todo el espacio, que se comportaría algo así como un fluido turbulento. Poco a poco se fue atemperando esa turbulencia, alcanzándose un nivel de temperatura homogéneo en todos los puntos. Todo ello en una pequeñísima fracción de segundo. Estos procesos habrían generado un espectro de ondas gravitatorias que si llegamos algún día a poder detectar nos darían una alternativa al LHC, o a tecnologías similares que le sigan, para el análisis de lo que sucedió en los momentos iniciales.

En ese universo de tamaño parecido al de una naranja, las partículas y la radiación que convivían en su tejido tenían que moverse a grandes velocidades al estar confinadas en un pequeño espacio. Dada

la alta energía de fondo, se podría crear un abanico extenso de partículas, desde las de gran masa hasta las más pequeñas. A pesar de que desconocemos las características reales del campo inflatón, incluso si realmente existió, se conjetura que las partículas creadas en el recalentamiento pudieron ser de tipo escalar, como algo semejante al Higgs; a las que se añadirían bosones asociados a campos vectoriales, como los fotones o los mediadores de la fuerza nuclear débil; más materia fermiónica, como los electrones o los quarks. E incluso partículas desconocidas por nosotros y que con posterioridad, a medida que se iba enfriando el Universo, dieron lugar a la materia bariónica[4] que observamos hoy en día.[5] Las velocidades serían tan grandes y la energía de la radiación tan brutal, que continuamente estarían chocando entre ellas, desapareciendo y creándose de nuevas.



Los dos tipos de ondas gravitatorias que se pudieron generar en los primeros momentos del Universo. Las primeras (en amarillo) como consecuencia de la rápida expansión del espacio-tiempo y las segundas (en azul-rojo) como consecuencia de los fenómenos de recalentamiento apuntadas en el texto (Imagen: Investigación y Ciencia, diciembre 2012, fair use)

Volveremos a este punto en otros capítulos. Antes voy a abrir un paréntesis en el relato y dedicar lo que queda de éste a hacer un sucinto repaso a algunas de las incógnitas que observamos y que la inflación exponencial nos ha permitido explicar… o no.

Densidad de energía *(… un bonito problema)*

En el capítulo anterior -cosa que como habéis visto remachamos en éste- ya dijimos cómo la inflación fue la responsable de generar toda la materia del Universo actual a partir de la nada del vacío, o quizás a partir de la energía del volumen de Planck equivalente a unos 10^{-5} gramos.[6] El modo tan especial en que se movió el campo inflatón durante la expansión fue embalsando en todos y cada uno de los nuevos cuantos del tejido del Universo una energía que llamamos "smooth tension" o "energía oscura" o "constante cosmológica". A fin de cuentas, distintos nombres para la energía que surgió del estado de vacío en que se encontraba el tejido del espacio-tiempo. También en los capítulos anteriores habíamos propuesto con gran imaginación unas voluntariosas hipótesis con las que explicábamos cómo era posible que a partir de la exigua energía de Planck apareciese la enorme cantidad de energía que hoy observamos.

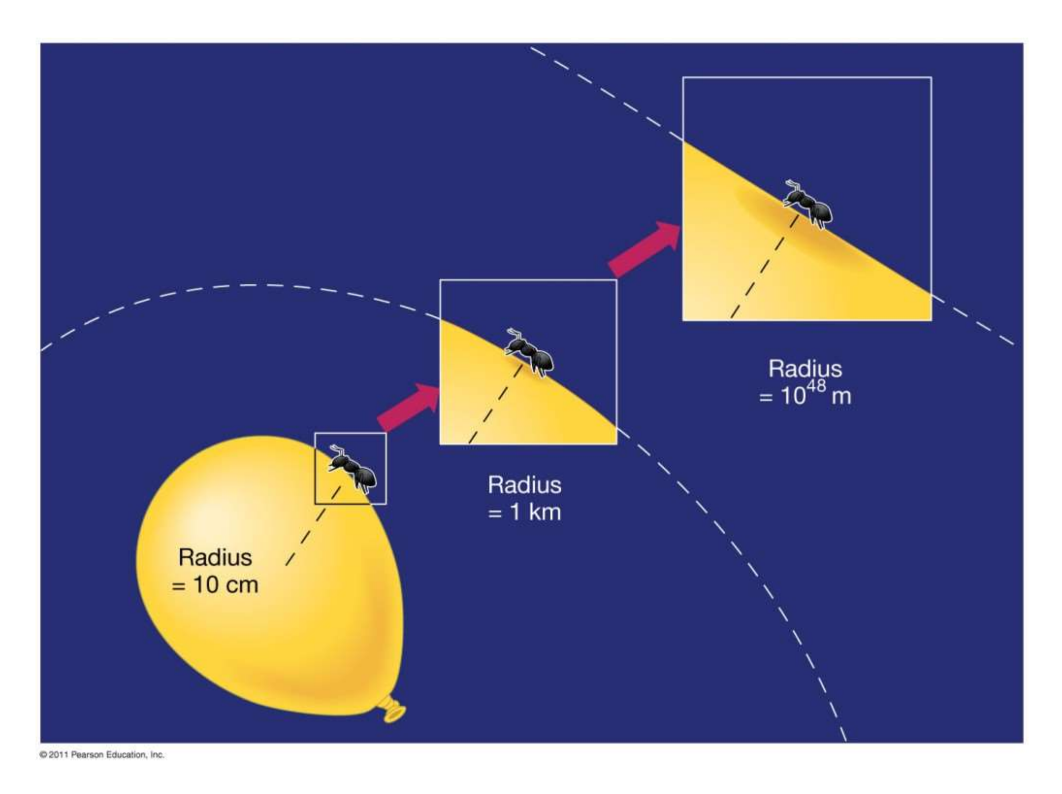
Pero la teoría exige explicaciones concretas. Y la verdad es que la realidad es más cruda. El problema que tenemos es que todas las veces que nos ponemos a hacer un ***cálculo teórico*** cuántico de la ***densidad de la energía del vacío*** llegamos a la cifra de $\boldsymbol{10^{91} gr/cm^3}$, mientras que la que medimos en la ***realidad observable*** es del orden de $\boldsymbol{10^{-29}\ gr/cm^3}$. Un "pequeño" problema a resolver de una magnitud de 10^{120}. En un rapto de optimismo, lo podemos ver más atemperado si pensamos en masas, ya que la densidad del vacío es proporcional a la cuarta potencia de una masa, lo que nos lleva a decir que la relación entre la masa calculada y la observada es de 10^{30}. Lo veamos como lo veamos, la incongruencia es muy elevada. Y hoy por hoy no tenemos ni idea del porqué.[7]

Planitud (… ahí parece que le hemos dado)

No todo son incógnitas. Observamos un Universo actual que se comporta como si su geometría -los más técnicos dirían *la métrica*-,[8] la que utilizamos en los cálculos que nos permite entenderlo, fuera plana. Es decir, que en el espacio-tiempo observable se cumple el que la suma de los tres ángulos de un triángulo es 180º. Como veremos en un capítulo posterior, cuando hablemos de la radiación de fondo de microondas emitida en el momento de la recombinación,[9] de la

propia estructura térmica de estas ondas se deduce una geometría Euclidiana, es decir, plana.

Quizás podamos entender mejor lo de la planitud a través de otro razonamiento. Sabemos, gracias a la fantástica intuición de Einstein objetivada en la relatividad general, que la masa-energía-presión genera una deformación del tejido espacio-temporal. Y creo que de tanto oírlo ya nos imaginamos bastante bien cuando se trata de concentraciones "puntuales" de masa, que al deformar el espacio provocan gravedad y desviaciones en las trayectorias de otros cuerpos con o sin masa. Pero si pensamos al nivel global de todo el Cosmos, toda la energía-masa contenida provoca también una curvatura general de todo el Universo.



Una hormiga experimentando asombrada como su mundo se va haciendo más y más plano a medida que se hincha el globo. Todo es cuestión de perspectiva (Imagen del libro "Astronomy today", pag 704, Eric Chaisson y Steve McMillan, fair use)

Si hay mucha energía, la curvatura será muy fuerte y cerrará al tejido espacio-temporal. Por el contrario, si hay poca energía la curvatura será ligera y dejará al Universo abierto. Sólo si la energía-masa es la adecuada el Universo adoptará una geometría plana entre la esférica

-cerrada- y la de silla de montar -abierta-. La maravilla es que la cifra de densidad crítica del Cosmos que exigen las ecuaciones de la relatividad es precisamente la que estamos observando cuando hacemos un inventario de lo que contienen las galaxias y los cúmulos.

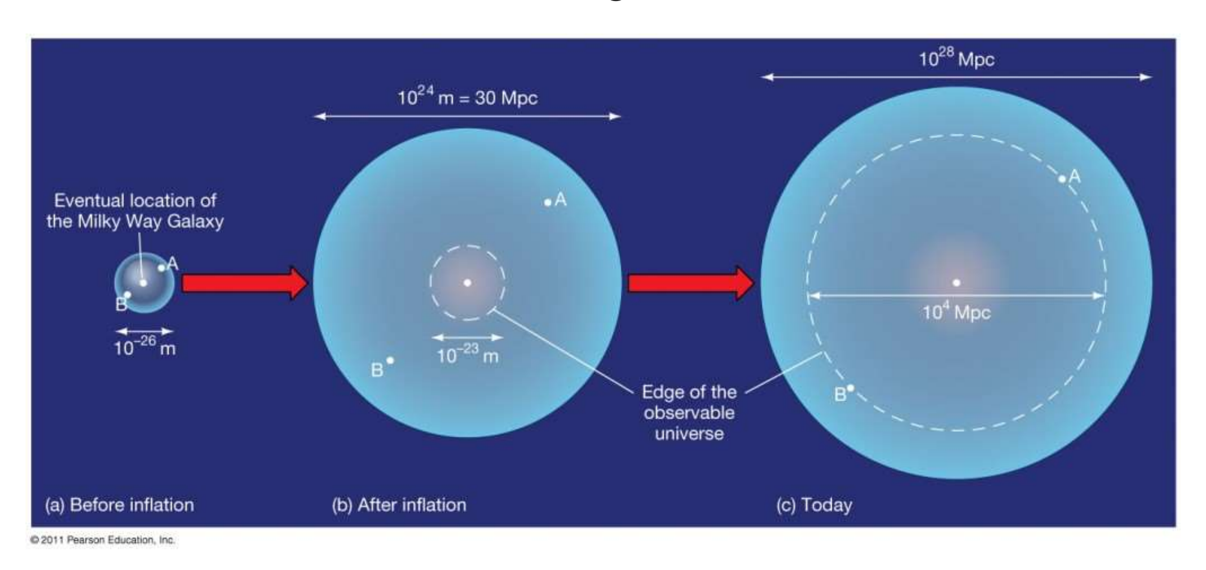
Si, como hemos comentado, el Universo pudo partir, y así lo consideramos en nuestras teorías, de una burbuja de la espuma cuántica básica, con una curvatura próxima al infinito, es lícito el preguntarse ¿cómo pudo llegar a ser plano? Pues gracias a que la inflación exponencial que sufrió esa burbuja expandió su tejido de tal manera que, en el momento actual, el pedacito de Universo que podemos observar,[10] aunque sea en esencia curvo, para nosotros es plano. Algo así como ver el mar desde la costa, que nos parece plano aunque siga la curvatura de la Tierra. Y es que tal como parece que runrunea la hormiguita de la figura de la página anterior… todo es cuestión de perspectiva.

Homogeneidad e isotropía ***(… en este caso no era tan difícil el problema)***

Otra peculiaridad que observamos es que el Universo es homogéneo e isótropo. Eso quiere decir que en lo macro tiene las mismas características en todos sus puntos, por ejemplo su densidad, y que además vemos lo mismo miremos hacia donde miremos desde cualquier punto de observación. Sí, hay estrellas y galaxias, pero perdidas en los inmensos vacíos cósmicos, aunque nos parecen masas dignas de titanes. Si nos fijamos en el conjunto del Universo, observamos que la temperatura es prácticamente igual en todos sus puntos: 2,275K. Los fotones que nos vienen por la derecha provenientes de hace 13.800 millones de años, la edad del Universo, son de la misma longitud de onda -la misma energía, la misma temperatura- que los fotones de hace 13.800 millones de años que nos vienen por la izquierda, o por arriba, o por abajo. ¿Por qué la temperatura es igual en todos los lados?

Nosotros sabemos que en un volumen cerrado que contiene gas, todas las moléculas, a la larga, tendrán la misma temperatura, pues todas se habrán influido con sus movimientos y choques, unas a otras, hasta que las cantidades de movimiento de cada una y todas las moléculas

sean en promedio iguales. A esto se le llama *estar en equilibrio termodinámico térmico*. Si en el Universo todos los puntos tienen una temperatura igual es porque han tenido la oportunidad de estar en algún momento juntos intercambiando y equilibrando sus energías. La información que nos trae la luz emitida desde cualquier punto que se encuentre en el borde del Universo salió de él hace unos 13.800 millones de años, justo su edad, que lógicamente es el tiempo que tardó su luz en llegar a nosotros.[11] Pero si miramos a nuestra derecha y luego a nuestra izquierda hacia el fondo profundo del Universo observable, la información que nos llega proviene de dos puntos separados el doble de lo que la luz pudo recorrer durante la edad del Universo. La única explicación para que su temperatura sea igual es que la distancia que los separa ahora en algún momento fue mucho menor. Tuvieron que ser colindantes, para con posterioridad separarse a una velocidad superior a la de la luz, la inflación exponencial, y situarse en las posiciones donde hoy los vemos. Sin inflación no se entendería la homogeneidad observada.



Explicación al problema del horizonte gracias a la inflación. Se ha dibujado esquemáticamente el borde del Universo observable y el del que se piensa que sea el total[12] *(Imagen del libro "Astronomy today",pag 703, Eric Chaisson y Steve McMillan, fair use)*

La imagen anterior es muy clarificadora de este tema, que se le conoce también como *el problema del horizonte*. La imagen recoge tres momentos, (a) justo antes de la inflación, (b) después de la inflación y (c) en el tiempo actual. En todos ellos el punto equivalente

al del observador actual se sitúa en el centro del correspondiente círculo, en realidad una esfera. Antes de la inflación, otros dos puntos A y B estuvieron tan próximos que pudieron llegar al equilibrio térmico.[13] Durante la inflación, A y B se han separado tan rápidamente que después de la expansión exponencial aún seguían en equilibrio térmico. En el momento (b) de la figura, el observador habría perdido de vista ambos puntos ya que a la luz aún no le habría dado tiempo a recorrer el espacio expandido, quedando fuera del universo observable del momento.[14] Pero en el momento actual, a la derecha de la imagen, sí que son visibles, y entonces el observador que ve llegar la luz de A y B se puede dar cuenta de que las características térmicas de los dos puntos son las mismas.

Estructura de la materia observada *(… ese sí era un problema difícil, al que parece que le hemos cogido el tono)*

Hay otro misterio que también parece que nos puede aclarar el proceso de expansión exponencial del Universo, todo gracias a la mecánica… según nuestra teoría… que siguió el campo inflatón. Hemos comentado en el capítulo anterior cómo a lo largo de su recorrido hacia una situación de mínima energía el Universo se iba expandiendo. A la vez, se iban generando en los puntos de su tejido fluctuaciones cuánticas que los dejaban energizados. Al principio estas fluctuaciones eran muy potentes, muy energéticas, y más tarde más atemperadas, lo que pudo configurar en el tejido espacio-temporal un bosque apretado de "púas" energéticas de fluctuación cuántica. El gigantesco estiramiento inflacionario en un factor de 10^{30} supuso necesariamente la separación y atenuamiento de estas "púas" en el mismo factor. Las grandes ondas en un vaso de agua se convirtieron en ligero cabrilleo de un océano. El Universo se volvió muy, muy homogéneo, aunque tenuemente rizado de energía. Imagen sutil, pero muy definitiva para lo que pasó en el futuro, porque fue ése el factor que condicionó y modeló a la distribución casi homogénea del nuevo mundo de partículas aparecido tras el recalentamiento, de forma que fue el germen por el que se pasó de la homogeneidad a los racimos de materia que hoy en día observamos mirando al cielo de nuestras noches. Las ligeras anisotropías debidas a las diferentes energías gestadas en las fluctuaciones cuánticas,

atemperadas por la inflación, fueron suficientes para crear un potencial gravitatorio que ordenó a la materia con el patrón que observamos hoy en la estructura de estrellas y galaxias. Cosa que ya analizaremos, por supuesto, en capítulos posteriores.

¡Qué grande es la inflación! Cuántos interrogantes planteados en nuestras observaciones adquieren un sentido bajo la luz de la inflación. La idea nos funciona, nos cuadra con lo que vemos y medimos. Pero no deja de ser una teoría escondida en la profundidad de una fosa energética del calibre de la de las Marianas,[15] que hoy por hoy nos es inalcanzable. Sin embargo no nos rendimos, porque aún nos quedan recursos en el tintero. Una tenue esperanza viene a través de las **ondas gravitatorias**.

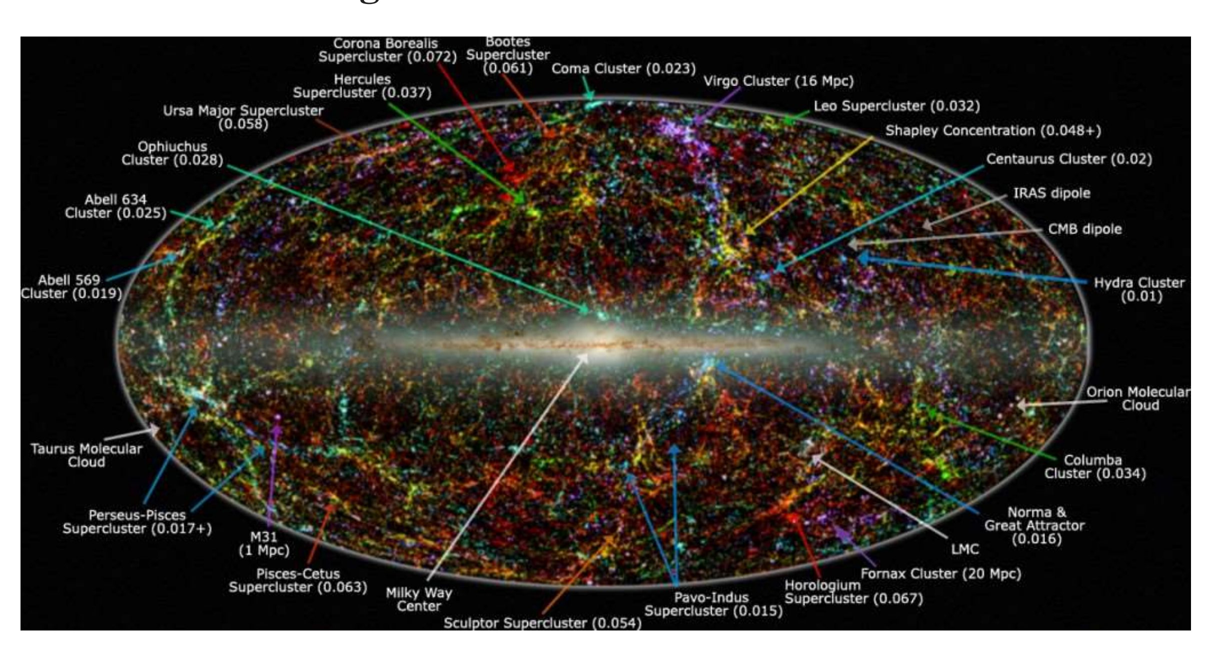


Imagen de la estructura del Universo a partir de la información de varios catálogos. En el centro hay una concentración de luz que no es más que la interferencia de la Vía Láctea. El resto, galaxias y cúmulos de ellas alineados en filamentos dentro del vacío del Cosmos (Wikimedia, dominio público)

Ondas gravitatorias *(… y llegaron las súper heroínas)*

¿Qué es eso de *ondas gravitatorias*? Copio de Wikipedia: "*En física, una **onda gravitatoria** es una ondulación del espacio-tiempo producida por un cuerpo masivo acelerado*" y que viajan a la velocidad de la luz, añadiremos. Por analogía, diríamos que aparecen

de igual modo que las ondas electromagnéticas se crean por cargas eléctricas en movimiento. Einstein predijo su existencia a través de sus ecuaciones y hasta hace poco sólo disponíamos de evidencias indirectas de ellas, como el decaimiento del periodo orbital observado en un púlsar binario que no podía ser producido de otra manera que al perder energía por la emisión de ondas gravitatorias. Pero en 2016 el experimento LIGO[16] nos dio una alegría al detectar unas ondas gravitatorias de unos cientos de hercios producidas durante el choque y posterior fusión de dos agujeros negros, hace ahora 1.400 millones de años. En 2017 un nuevo gran paso: la detección de las ondas gravitatorias resultante de la fusión de dos estrellas de neutrones a 130 millones de años luz de la Tierra. Con una GRAN ventaja añadida… estos cataclismos cósmicos provocan una emisión de rayos gama de alta energía que han podido ser detectados con nuestros telescópios ópticos, lo que va a permitir analizar un evento gracias no solo a su "imagen", como hasta ahora, sino también gracias a su "sonido". Un nuevo sentido ha entrado en juego en la Cosmología.

Al inicio del capítulo ya explicamos cómo se pudo desarrollar el cambio de estado que sufrió el Universo, aquel que llamamos *recalentamiento*. El proceso de creación de materia debió ser tan violento, con unas partículas chocando a velocidades relativistas, que provocaría un gigantesco tren de ondas gravitatorias generadas por la energía perdida en esos choques. Se supone que la energía que se desvió hacia la creación de estas ondas pudo llegar a ser del orden de una millonésima de la energía total en juego durante el recalentamiento. Al igual que una piedra alborota la superficie del estanque esculpiendo un tren de olas, la súbita aparición de tanta materia alborotó el tejido espacio-temporal del Universo. Al ser la gravedad una interacción tan débil -comparada con la fortaleza de las otras tres fuerzas fundamentales conocidas-, las ondas del Big Bang pudieron desacoplarse del plasma de partículas y energía, propagándose por el espacio, literalmente arrugando el tejido espacio-temporal, a velocidades cercanas a la de la luz. De forma que en estos momentos de tranquila lectura aún lo deben estar haciendo, llevando en sus lomos la información de lo que pasó durante el recalentamiento.

Como ocurre en cualquier movimiento ondulatorio, las características de las ondas dependen del sistema físico en donde se crean. Teorizando con las propiedades físicas del Universo en el momento en que se generó el mar de ondas gravitatorias, y a pesar que desde aquel momento el universo se ha estirado en un factor de 10^{26}, se ha podido llegar a la conclusión de que hoy las podríamos observar con un pico en el espectro de frecuencias entre docenas de kilohercios y el gigahercio,[17] dependiendo de la escala de energía a la que ocurrió el proceso de recalentamiento del universo posterior a la inflación. El descubrimiento de dicho fondo abriría una nueva ventana al universo primitivo. Estaríamos viendo cómo era el universo 10^{-32} segundos después de haberse iniciado.[18]

Así que ahí hay que buscarlas, y además esperando ver un espectro de distribución espacial caótico y turbulento, como corresponde a sus orígenes. Algo muy distinto al suave espectro de las ondas de la radiación de fondo de microondas emitidas mucho más tarde, 380.000 años tras el Big Bang. A pesar de la homogeneidad de estas últimas, quizás también podamos encontrar en ellas pistas indirectas de las ondas gravitatorias generadas durante el recalentamiento. Hablaremos de la radiación de fondo de microondas en su correspondiente momento cronológico. Acabamos ahora anunciando el tema del próximo capítulo que dedicaremos a hablar de cosas que, aunque teóricas, nos van a decir mucho acerca de los personajes que habitaban aquellas “oscuras” edades.

NOTAS DEL CAPÍTULO 06:

1. Con relación a la finitud o no del Universo hay que pensar que toda nuestra experiencia sobre él, y los cálculos que más nos aproximan a lo que vemos, están basados en el principio cosmológico de un universo homogéneo -igual en todos sus puntos- e isotrópico -en cualquier dirección que miremos vemos lo mismo-. Si esto es así el Universo no podría tener bordes en donde se perdiera la homogeneidad. Luego si hay que apostar hay que hacerlo a la baza de que es finito y cerrado.

2. Para saber un poco más acerca de cómo interactúan teóricamente los campos cuánticos y cómo de estas interacciones surgen las partículas, recomiendo leerse los magníficos artículos del blog "*Of particular significance*", de los que selecciono dos (enlaces más abajo), relacionados con lo que hablamos en este momento en nuestra serie.

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/7-particles-are-quanta/]

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]

3. Pensemos que nuestro orgullo está en el LHC -Large Hadron Collider- con una capacidad de ver y profundizar en energías hasta un máximo de 13×10^{12} eV.
4. Simplificando, la materia bariónica es la compuesta básicamente por protones, neutrones y electrones.
5. Para más detalle de todo lo anterior ver este artículo de la revista Investigación y Ciencia:

   [http://projects.ift.uam-csic.es/outreach/images/articles/ventana-bellido.pdf]

6. Lo cual no quiere decir que sea lo mismo que una baja densidad de energía: la de Planck es del orden de 10^{94} gr/cm^3.
7. Para más detalles podéis ver este artículo:

   [http://www.astronomia.net/cosmologia/lambda.htm]

8. Aquí propongo un enlace en donde se explica de forma muy didáctica qué quiere decir esto de la métrica en cosmología. La verdad es que el artículo está dedicado al motor de Alcubierre… o cómo moverse por el tiempo sin necesidad de agujeros de gusano o similares.

[https://cuentos-cuanticos.com/2016/11/23/el-motor-de-curvatura-de-alcubierre-viajes-hiper-rapidos-en-relatividad-general/#more-9916]

9. A los 380.000 años del Big Bang.

10. Aquel en donde se encuentran los objetos que vemos… y que vemos porque se encuentran a una distancia tal que la luz que emiten nos puede llegar. Los fotones de los más lejanos se han movido a 300.000 km/seg a lo largo de los 13.800 millones de años de historia del Universo, más lo que se ha expandido de base el tejido del Universo desde entonces. Lo que nos da una esfera cósmica observable de unos 1,37 x 10^{26} metros de radio.

11. De los que están más lejos no sabemos nada: no podemos verlos, pues la luz no ha tenido aún tiempo suficiente como para llegar hasta nosotros. Está todavía de camino. Este límite es precisamente lo que define el límite del Universo observable.

12. En esta imagen se ha supuesto que el factor de crecimiento del Universo durante la expansión fue de 10^{50} en lugar de los 10^{30} que planteamos a lo largo de los capítulos de este libro, que es lo planteado por el conocido astrofísico y divulgador británico John Gribbin en su libro "*Biografía del Universo*".

13. Esto quiere decir que tanto A como B como el punto Observador igualaron las mismas características termodinámicas.

14. Que en el momento (b) era el producto de la velocidad de la luz, 300.000 kilómetros/seg y el tiempo del momento, 10^{-32} segundos, es decir los 10^{-23} metros indicados en la figura.

15. La **fosa de las Marianas**, en el fondo del océano Pacífico occidental, es la más profunda fosa oceánica conocida y el lugar más profundo de la corteza terrestre.

16. **LIGO** es un observatorio de detección de ondas gravitatorias. La sigla proviene de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser).

17. Estas frecuencias se sitúan en el ámbito de las microondas y las ondas de radio. En cualquier caso, una frecuencia muy similar a la del sonido. Los científicos han trasladado una frecuencia a la otra para crear sonidos audibles. En el siguiente enlace podréis

escuchar el ruido que hacen dos agujeros negros al chocar. Sorprendente ¿no?

[https://www.youtube.com/watch?v=LBWN8MYeSDk]

18. Véase este artículo para más información.

[https://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/17/posts/ondas-gravitacionales-provenientes-de-la-gran-explosin-10299]

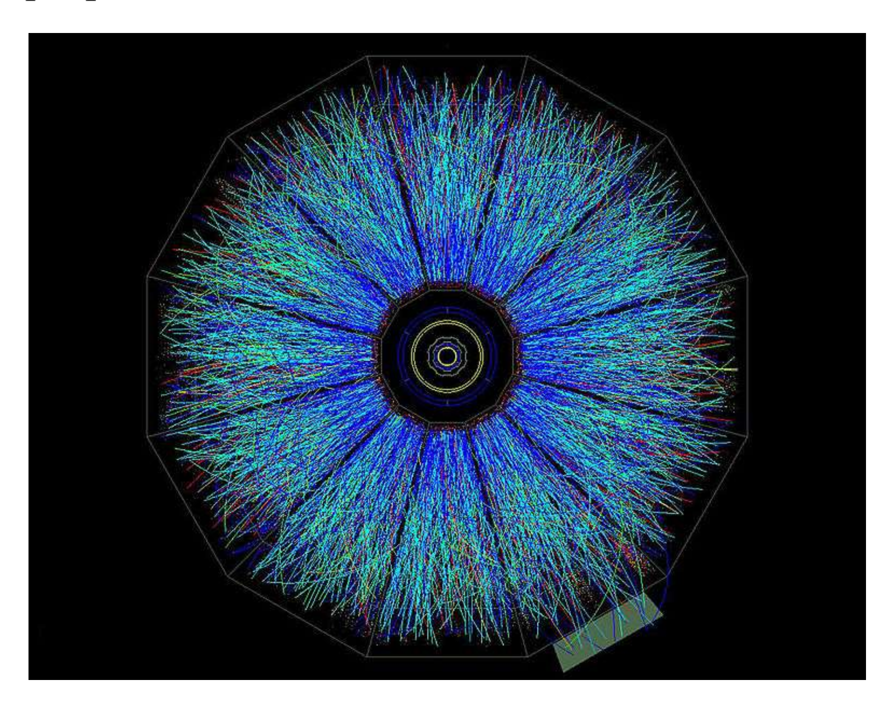
07: De materia y antimateria. Un poco de teoría I

En el anterior capítulo salimos de la inflación exponencial con todo un futuro por delante. Llegamos a entender cómo a partir de ella pudo eclosionar un mundo del tamaño de una naranja que existía en sí mismo, acotado por nada. Un mundo en donde violentos vórtices de energía chocaban unos con otros, mientras aparecían y desaparecían los nuevos habitantes del espacio-tiempo, partículas y más partículas, a lomos de nuevos y misteriosos campos cuánticos, desplazándose a velocidades relativistas. Tras una brevísima fracción de tiempo la temperatura del Universo había llegado a ser del orden de 10^{26}K, con una energía media que se había situado en la plataforma de 10^{24} eV. Era el tiempo $t = 10^{-32}$ segundos, y había todo un universo por delante.

A medida que avance la serie nos vamos a encontrar en nuestro joven Universo con unos personajes que llevan una vida social muy activa y cambiante, ajustándose a las condiciones de temperatura y energía de cada momento. Las leyes que posiblemente actúen en esta física son bastante complejas, aunque creemos entenderlas razonablemente bien. Pensamos que estamos en el buen camino, ya que lo que vamos deduciendo a partir de ellas se ajusta bastante bien a lo observado.

No obstante, mirar directamente a los inicios de esta sopa de materia y radiación queda aún muy lejos de nuestras posibilidades. La continua expansión que siguió a la inflación llevó al Universo desde un nivel promedio de energía de partida de 10^{24} eV en el recalentamiento, llegando a 1 eV cuando se formaron los primeros átomos, para continuar al escaso milielectronvoltio de hoy. Nuestro más potente "telescopio regresivo" es el LHC que se zambulle hasta unas profundidades del entorno de los 10^{13} eV. Con él podemos reproducir las condiciones del Universo cuando tenía 10^{-12} segundos de vida. Pero no nos podemos remontar más atrás, hasta las condiciones del momento $t=10^{-32}$ segundos, cuando el recalentamiento estaba marcando el paisaje. Y aunque parezca poco,

en estos 10^{-12} segundos iniciales -invisibles para nosotros- pasaron, o creemos que pasaron, muchas cosas realmente decisivas.



Fotografía de una colisión entre dos haces de iones de oro que se produjo en el RHIC del Laboratorio Nacional de Brookhaven en USA (2005). Se trata de un plasma de quarks-gluones que pudiera ser, salvando las distancias energéticas, del tipo que había en el Universo cuando tenía una edad de 10^{-12} segundos (Imagen: Brookhaven National Laboratory, CC BY-NC-ND 2.0)

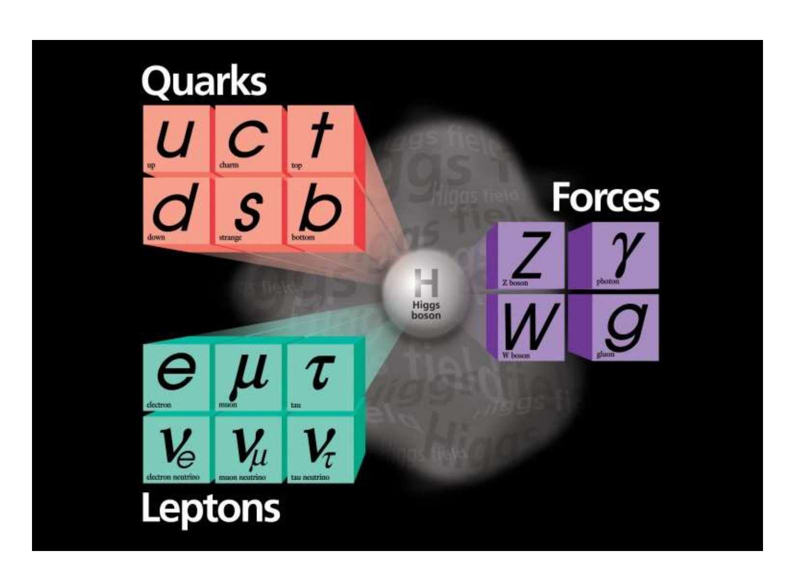
Para saber de esta época inicial nos apoyamos en nuestras teorías, en las que confiamos, aunque queden bastantes agujeros que aún no sabemos rellenar. Nuestro escudo se llama **Modelo Estándar de la física de partículas**.[1] El Modelo Estándar es un cuerpo de doctrina física construido a partir de varios participantes: la **teoría especial de la Relatividad** y la teoría sobre **Mecánica Cuántica**.[2] Por desgracia, la gravedad aún no se habla muy bien con ellas y por eso en el edificio no encaja la teoría general de la Relatividad. Es cierto que la gravedad cuántica tiene puestas sus esperanzas en un buen número de teorías o simplemente ideas desarrolladas, como lo son lo que los físicos teóricos llaman Supersimetría o en la tan mencionada teoría de cuerdas o de la gravedad cuántica de lazos. Pero ya se verá. Hoy nos sentimos bastante cómodos con el Modelo Estándar y con él tenemos mucho sobre lo que pensar.

Pero a este modelo hay que darle de comer. Como datos de entrada, las características de las partículas de la naturaleza, aquellas que en cada momento se conocen y se han podido medir: sus masas, cargas, spin… También se tiene en cuenta otro cuerpo de teorías que describen de qué forma interaccionan las partículas entre ellas: la **fuerza nuclear fuerte** -desarrollada por la *cromodinámica cuántica*-, el **electromagnetismo** y la **fuerza nuclear débil** -desarrolladas en su conjunto por la *teoría electrodébil*-. Observad cómo no entra en el juego la cuarta fuerza de interacción, que es la **gravedad**. En los cálculos también se tienen en cuenta una serie de simetrías que se observan en el Universo y que obligan, en base a ellas, a que ciertos parámetros no varíen -energía, momento, carga…- pasara lo que pasara.

El resultado del Modelo Estándar confirma la existencia de partículas/ondas que conocemos más comúnmente como materia o radiación. Nos dice también que estos personajes son capaces de interactuar a través de la mensajería realizada por los tres campos cuánticos de fuerzas y del comportamiento que se induce cuando se entrelazan los campos específicos de cada tipo de partícula. Podemos imaginar el proceso al saber cómo aparecen las partículas/ondas. Cualquier excitación energética en un punto de un campo se traduce en una oscilación del mismo, una onda, que cuando lo hace en su frecuencia fundamental conforma la partícula adherida a este campo. Así, por ejemplo, la excitación del campo electrón engendra un electrón, así como la del campo electromagnético genera un fotón. Estas vibraciones de distintos campos se entrelazan de acuerdo a la fuerza de enlace entre ellos. Y por eso el fotón interrelaciona con el electrón. Éste es el proceso general que determina la física -y que se observa en la química- de nuestro Universo. A partir del mismo momento inicial de nuestra historia.

Aunque parece que todas estas explicaciones teóricas nos desvían del camino propuesto, no queda más remedio que hablar de ello para una mejor comprensión de lo que vamos a descubrir. Nos queda aún por ver la nómina de los personajes más elementales que van a estar presentes.

Con relación a los campos, hasta ahora sólo hemos hablado en otros capítulos de un hipotético campo de unificación -el de la interacción GUT-[3] con sus bosones X e Y, o de un no menos hipotético campo inflatón[4] y su probable partícula, el inflatón. Pero, como hemos comentado, cada campo tiene una partícula/onda asociada, así que hablemos de las partículas.[5] El modelo estándar maneja dos tipos de partículas: los **hadrones** y los **bosones**. Los primeros son los que van a formar la materia que observamos -los *quarks* y sus subproductos, como el protón o el neutrón, y los *leptones*, como el electrón o los neutrinos- y en cuanto a los segundos, son los que van a mediar las fuerzas fundamentales -el fotón, el gluón…-. Sin olvidarnos a sus *partenaires* de la antimateria, las mismas partículas pero con cargas opuestas. Es curioso cómo las partículas de materia conocidas, los hadrones, se agrupan formando familias: tres de quarks y otras tres de leptones, con unas masas situadas a tres niveles progresivos de energía, sin que se descarte el que podamos encontrar más partículas a energías superiores. Y en cada una de las familias hay partículas de dos "sabores". Por otro lado están los cuatro tipos de bosones que intermedian en cada una de las fuerzas fundamentales, a los que se les ha unido el higgs, de reciente puesta de largo en sociedad.[6]



Nómina de partículas elementales del Modelo Estándar. Hay que observar cómo el bosón de Higgs no interactúa con los fotones y los gluones, partículas sin masa. Su interacción con los neutrinos no es muy bien conocida. (Imagen: Fermilab, fair use)

Las partículas y antipartículas pueden generarse a través de diversos procesos, siendo posiblemente estos dos que cito a continuación los más frecuentes: pueden *aparecer espontáneamente del vacío cuántico*, o bien producirse a pares *como resultado del choque de fotones*, preferentemente dos, con una energía conjunta por encima de la equivalente a la masa de la partícula. A través de él la energía de los dos fotones se transforma en materia, partícula y antipartícula, según la ley einsteniana de $E = mc^2$. La reacción contraria también es posible y es lo que sucede si partícula y antipartícula no se alejan lo suficiente tras su aparición -y todo depende de la velocidad de expansión del Universo-: se aniquilan una a la otra dejando un rastro de radiación. Estas reacciones, a millones, como la que se escribe más abajo, parece que tendrían que producirse en equilibrio, debiendo contabilizarse las mismas en un sentido como en el opuesto. Si uno de ellos fuera claramente el dominante, sólo veríamos partículas que habrían ganado a la radiación, o radiación que habría aniquilado a las partículas. Y sin embargo, la energía que observamos en nuestro universo es una mezcla de todo: mucha radiación, bastante menos materia y una pizca infinitesimal de antimateria. Y esto último sí que es raro, ya que o debería haber la misma materia que antimateria, o no debería haber nada ni de una ni de otra.

Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula

Podríamos postular que esta diferencia viene "de fábrica" y que fuera una característica natural del universo desde su nacimiento. Lo que observamos hoy en día parece decirnos que hay una partícula de antimateria por cada diez mil millones de partículas de materia, es decir, que su relación de densidades es de 10^{-10}.[7] Dado que cualquier asimetría bariónica primordial habría sido diluída exponencialmente durante la inflación, el dato observado hoy exige la existencia de una diferencia durante la época GUT[8] del orden de 10^{69}. Este número parece impensable como dato que venga según lo que hemos denominado ser "de fábrica", por lo que se considera más probable que inicialmente la diferencia entre materia y antimateria fuera nula para con posterioridad, y a través de algún proceso físico hoy por hoy desconocido, se generara el parámetro de asimetría tan pequeño que se observa ahora. Por eso los físicos se las están ingeniando, sin

ningún resultado concreto convincente todavía, aunque de forma esperanzadora, buscando procesos que hubieran podido producir la diferencia materia-antimateria que hoy se observa.

"Y hasta aquí puedo leer", tal como era una famosa muletilla de un famoso concurso televisivo en el que participaba una calabaza.[9] En el siguiente capítulo seguiremos en hablando del físico ruso Andréi Sájarov, padre de la teoría que resulta ser la biblia para todos los que estudian el misterio poblacional de la materia y la antimateria.

NOTAS DEL CAPÍTULO 07:

1. Para saber más del modelo estándar sin entrar en demasiadas complicaciones ver la serie "*Cuando un modelo es estándar*" del blog "*Cuentos Cuánticos*".

   [Primera entrega de tres: https://cuentos-cuanticos.com/2011/09/13/cuando-un-modelo-es-estandar-13/]

2. Recomiendo para moverse con una cierta soltura en estos dos campos de la física leer las respectivas series del blog "*El Tamiz*", de Pedro Gómez-Esteban, que tituló como "*Relatividad sin fórmulas*" y "*Cuántica sin fórmulas*".

   [https://eltamiz.com/relatividad-sin-formulas/]

   [https://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/]

3. Que debía fijar las interacciones entre partículas en la época de la gran unificación, antes de iniciarse la inflación exponencial preconizada por Alan Guth.
4. El que generó precisamente la energía que provocó la inflación.
5. Recomiendo de nuevo la serie del blog "*El Tamiz", "Esas maravillosas partículas*".

   [http://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]

6. El bosón de Higgs o partícula de Higgs es una partícula elemental propuesta también en el modelo estándar de física de

partículas. Recibe su nombre en honor a Peter Higgs quien, junto con otros, propuso en 1964 el hoy llamado mecanismo de Higgs para explicar el origen de la **masa de las partículas elementales**. Hablaremos de él en su momento.

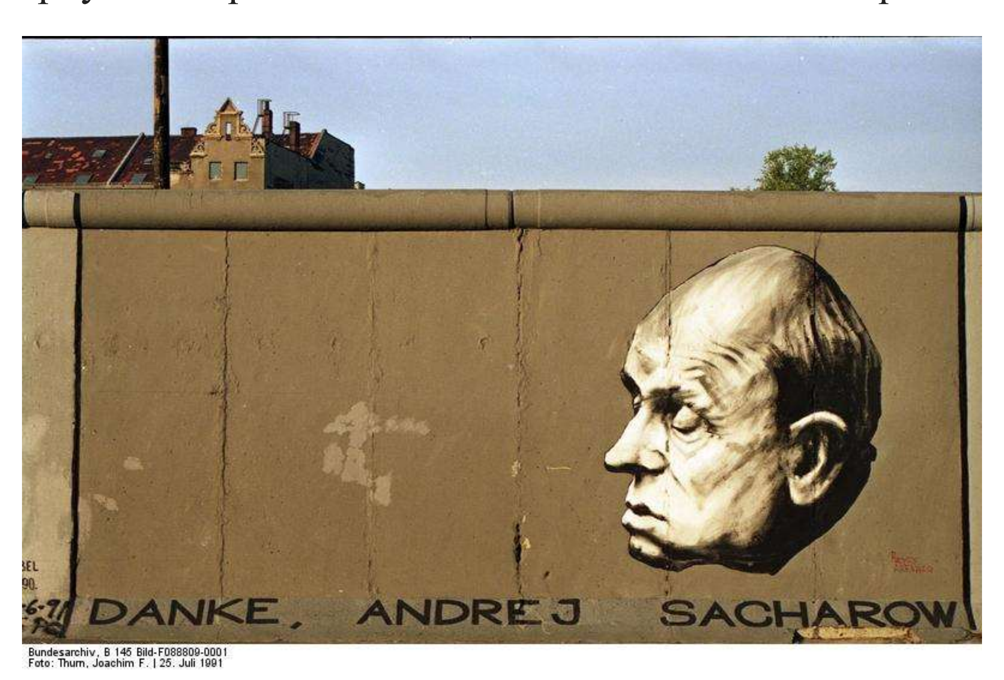
7. Realmente según esta publicación de Davidson, Nardi y Mir, parece que está en el siguiente rango de $0.16 < \eta \times 10^{10} < 6.2$, siendo η un parámetro que cuantifica la relación de densidades de bariones y antibariones, y que es conocido como el parámetro de asimetría.

   [https://arxiv.org/pdf/0802.2962v3.pdf]

8. Anterior a la inflación.
9. Evidentemente si sois españoles de una cierta edad lo habréis adivinado: se trata del ínclito "Un, dos, tres" en el que se freía a la pareja de participantes a recordar cosas triviales ¡Y con grandes premios!

08: De materia y antimateria: Un poco de teoría II

Al final del capítulo anterior nos habíamos permitido lanzar un largo suspiro con el que abrir un descanso, ya que las pinceladas de necesaria teoría que habíamos trazado acerca de la materia y sus interioridades habían cubierto un espacio más que suficiente. Prometí hablar del científico que planteó las bases técnicas sobre las que se debía apoyar cualquier estudio sobre la antimateria. Y aquí va.



"Danke, Andrej Sacharow", mural en homenaje a Andréi Sájarov pintado en 1990 sobre el muro de Berlín (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Hace más de 40 años, y aún son válidos hoy en día, el físico Andréi Sájarov[1] propuso los principios que tenía que contener la Física que podrían explicar la asimetría de partículas y, como consecuencia, la abrumadora existencia de materia frente a la antimateria.[2] En líneas generales, dijo que a altas energías se debían dar procesos simétricos de generación de bariones y de antibariones, en tanto en cuanto se crearían el mismo número de unos que de otros, formándose así un universo numéricamente equilibrado respecto a ambos tipos de

partículas. Sin embargo, entre todas estas interacciones alguna, o algunas, tenían que violar este equilibrio. De todas formas, esta violación debería ser muy ligera, debido al hecho de que las interacciones que violan el número bariónico podrían intervenir en la desintegración del protón. Y sabemos que el protón es superestable.[3]

Como consecuencia de lo anterior, el que en algún proceso se incumplieran ligeramente las reglas de la simetría justifica la segunda condición de Sájarov. En particular se refería a las reglas de la simetría CP -de carga y de inversión especular espacial-: la C cambia partículas por antipartículas y la P, coordenadas espaciales positivas por negativas, que en el fondo supone poder cambiar el sentido del espín de las partículas.[4] Si se cumplen ambas simetrías combinadas, lo único que hacen las interacciones que modifican a los bariones es cambiar elementos de “estantería” -unos bariones por otros-, aunque siempre manteniendo el equilibrio entre unos y otros. Por ello hay que postular una rotura de esta simetría para comprender la realidad de una bariogénesis a favor de un bando de bariones.[5]

Sájarov aún pensó en una tercera condición: la bariogénesis se tuvo que producir en algún momento en que el Universo no estuviera en una situación de equilibrio térmico. Eso es así ya que, en equilibrio térmico, el mismo número de partículas-antipartículas que se crean por pares desaparecen por pares, manteniendo así sus familias y proporciones. Para romper esta situación en algún momento se tiene que abrir una válvula de escape de antimateria en la olla perpetua del equilibrio térmico.

Dicho lo anterior había que remangarse, ponerse a trabajar y encontrar evidencias teóricas o experimentales que demostraran que estas tres condiciones se dan -mejor: se dieron- en algún momento. Las observaciones nos han asegurado que en el Universo se dan determinadas reacciones de aniquilación –por ejemplo, entre unas partículas llamadas kaones-[6] en las que se viola la simetría CP. Pero también se piensa que no explicarían la bariogénesis, ya que se tratan de reacciones muy débiles. Desde la física del Modelo Estándar, o también del modelo de la Supersimetría o de las teorías de cuerdas, se apuntan otras posibilidades que aún están muy lejos de ser comprobadas.[7]

Como puede aclarar nuestras ideas sobre el tema, paso a exponer brevemente uno de los casos expuestos por estas físicas-matemáticas basado en la teoría de la gran unificación (GUT), que postula la existencia a altas energías -y por tanto en el inicio de la vida del universo- de bosones muy masivos nombrados como bosones X e Y.[8] Estos bosones se desintegran a altas temperaturas en bariones y leptones, según las ecuaciones que siguen,

X → (51% de las desintegraciones) quark $_{up}$ + quark $_{up}$

X → (49% de las desintegraciones) positron $^{+}$ + antiq $_{down}$

antiX → (49% de las desintegraciones) antiq $_{up}$ + antiq $_{up}$

antiX → (51% de las desintegraciones) electron^{-} + quark $_{down}$

pero al hacerlo así dejan más quarks que antiquarks. En cada una de las parejas de desintegraciones (la primera de materia y la segunda de antimateria) se producen quarks de distintos tipos según el porcentaje indicado. Del análisis de las anteriores parejas de reacciones podemos deducir que tras cien desintegraciones de ambas, eliminando la materia y la antimateria resultante homóloga, que se aniquilarán mutuamente, nos va a quedar (contando sólo las partículas bariónicas):

2 [quark $_{up}$ + quark $_{up}$] + 2 quark $_{down}$

Como los protones están formados por dos quark $_{up}$ y un quark $_{down}$ y a la vista del resultado anterior, podemos asegurar que por cada cien interacciones de un tipo más cien interacciones del otro tendremos como resultante a dos protones de materia que no tienen compañeros de antimateria. En las ideas de Sájarov podemos encontrar entonces una posible explicación de porqué observamos exclusivamente materia y no antimateria, y por qué hay tanta divergencia numérica entre la materia y la radiación.

Ahora ya podemos seguir tranquilos nuestra historia sabiendo -suposición absolutamente teórica- que el trabajo de los bosones X es el que ha modelado el universo. En resumen: los bosones X en su desintegración no cumplían al pie de la letra la simetría CP, de forma

que generaban un escasísimo porcentaje más de materia que de antimateria. Pero ello fue trascendente mucho más tarde gracias al impulso de la inflación, separando a las parejas materia-antimateria y restándoles energía cinética con el enfriamiento, de forma que se iban encontrando muy poco a poco, aniquilándose, dejando como balance un pequeño poso dominante de partículas de materia, la base de lo que luego será la que hoy percibimos y la que intuimos: materia luminosa como contrapuesta a materia oscura.

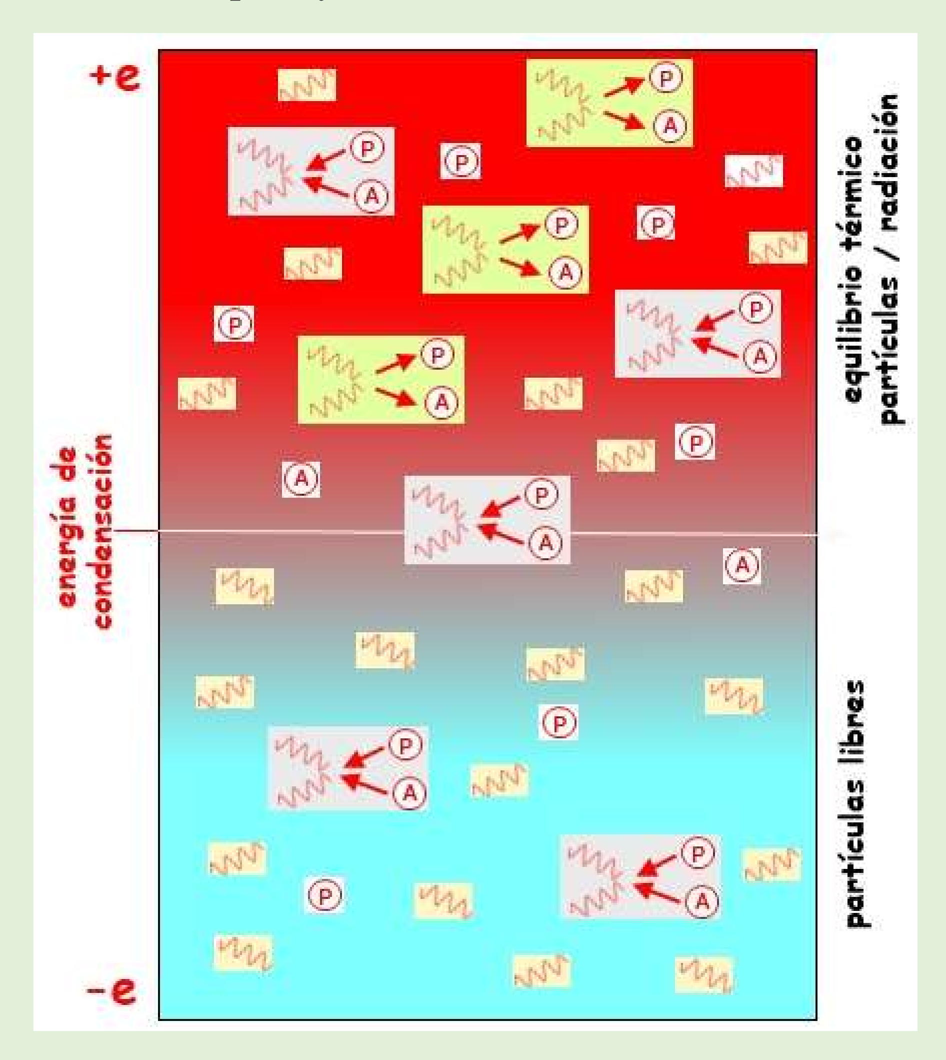
Nota: Teoría complementaria sobre la aparición de materia

Antes de acabar esta capítulo voy a plantear un tema que creo va a permitir arrojar un poco de razonamiento intuitivo al comportamiento de partículas y energía en el plasma que constituía el universo de los primeros minutos ¡y años!, que nos ayudará a comprender los procesos de condensación -nacimiento a partir de la energía de la radiación- de las partículas.

Para crear una determinada cantidad de masa de materia se requiere una determinada energía, según la relación $E = mc^2$*. Energía que en parte puede ser utilizada para imprimir un movimiento a la partícula nueva. Para una determinada energía media del Universo en teoría se pueden crear cualquier tipo de partículas, siempre que el equivalente energético de sus masas sea inferior al nivel energético del momento. Así, a muy altas energías, podrían crearse por choque entre partículas de radiación -fotones- pares de partícula/antipartícula de gran masa que se moverían a velocidades lentas, o bien podrían aparecer las de pequeña masa con grandes velocidades. La contrapartida a la creación de pares es su aniquilación, partícula contra antipartícula, devolviendo radiación al Universo. Y esto es un proceso continuo que sucede sin tregua hasta que el progresivo enfriamiento del Universo debido a su expansión le lleva al nivel de temperatura de condensación de cada partícula, precisamente cuando el nivel de energía medio es igual al de la masa de la partícula. Por debajo de este punto ya no hay suficiente energía para crearlas, perdiendo progresivamente su población debido a los procesos de aniquilación*

materia/antimateria. Al final van a quedar muy pocas, aunque a ellas deberíamos sumarles las que saltan por brevísimos instantes desde el vacío por causa de los procesos cuánticos (ver la siguiente figura).

de los fermiones -electrones, muones, tauones y neutrinos- y de los bosones con masa –pión y los tres débiles-.



Esquema de lo explicado en el texto acerca de la condensación de una partícula P. Desde una fase caliente en donde se encuentra en equilibrio térmico con su antipartícula y la radiación, tras pasar la barrera energética de su condensación llega a una fase fría en donde finaliza la aniquilación, quedando sólo los fotones de la radiación y la materia residual surgida en la asimetría con la antimateria.

¿En qué momento llega la energía de condensación? En el momento en que el Universo, en su expansión, alcanza la temperatura fijada por la siguiente ecuación:

Temperatura = Energía de condensación/constante de Boltzman

En resumen, y generalizando, podríamos decir que en la vida de cada partícula hay dos etapas.

La primera, cuando en el intervalo de energías adecuadas se encuentra en equilibrio térmico con su antipartícula y con la radiación, que precisamente es lo que indica la siguiente igualdad si suponemos que transcurría igual de derecha a izquierda que de izquierda a derecha:

Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula [1]

Y la segunda etapa, que comenzaría en la frontera energética fijada por la siguiente igualdad:

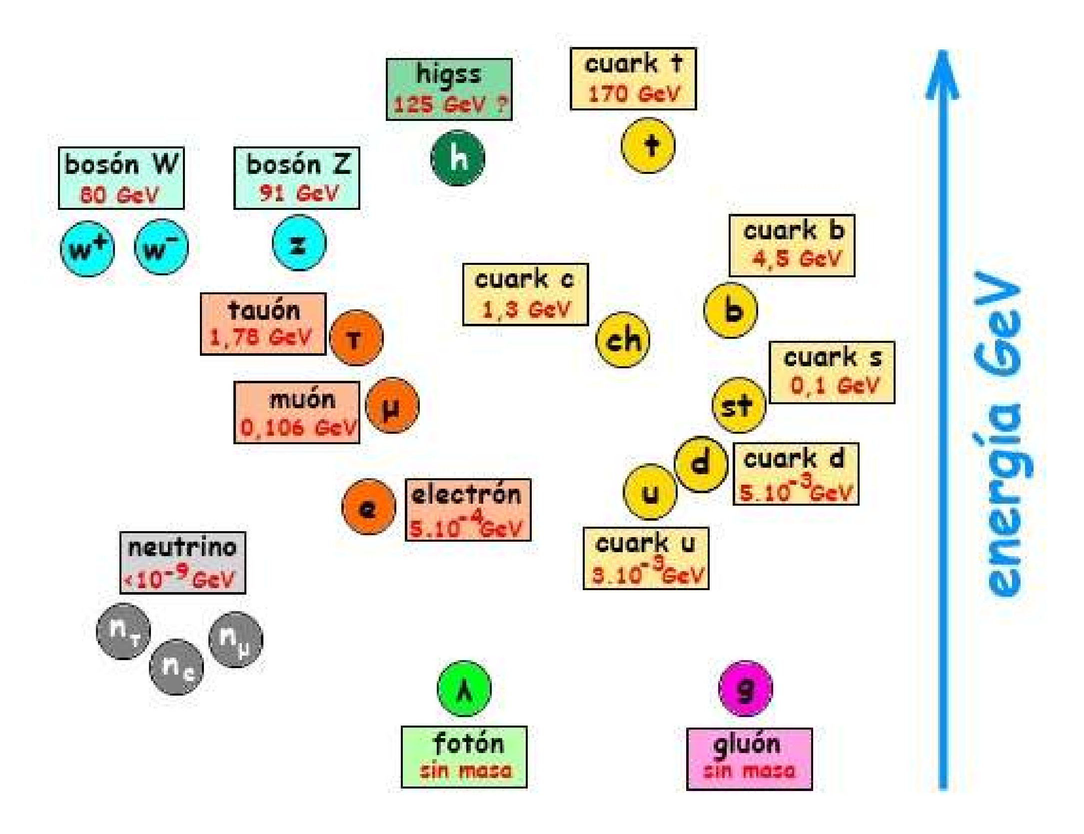
Energía de la radiación = masa de la partícula / (velocidad de la luz)2 = energía de condensación de la partícula

momento en que la ecuación [1] anula su camino de izquierda a derecha, quedando en exclusiva el inverso, hasta que sólo quede el pequeño número de partículas consecuencia del exceso inicial de materia frente a antimateria.

Así que, a medida que desciende la temperatura del Universo, que es lo mismo que descender su energía, se iban consolidando las partículas elementales que hoy nos rodean, desde las de mayor masa a las de menor. Y estamos hablando fundamentalmente de los quarks, Para llegar a condensarse las que llamaremos **partículas compuestas**, fundamentalmente protones y neutrones formados por tres quarks, y en consonancia con lo que hemos dicho, habrá que esperar a que el nivel de energía baje lo suficiente, pero no demasiado, para que permita actuar a la fuerza nuclear fuerte que los une con sus gluones. Protones y neutrones deben tener una velocidad muy ajustada entre una alta, que les haría rebotar una partícula con otra, y una baja, que no las aproximaría lo suficiente como para que actuaran los bosones de la interacción nuclear fuerte. Así que no sólo necesitaba el Universo el nivel energético adecuado para expresar su

materia más elemental, sino también para poder permitir actuar a las fuerzas fundamentales. Primero, para que los correspondientes bosones intermediadores salidos del vacío pudieran condensarse el tiempo suficiente -lo que conocemos como el *tiempo característico de las interacciones*- como para que se produzca la intermediación. Segundo, para que las partículas de materia puedan aproximarse de forma que se coloquen dentro de la distancia de alcance de la fuerza, lo cual es muy importante para las de muy corto alcance como son las dos nucleares.[9]

En el siguiente esquema quedan representadas las partículas más fundamentales del Modelo Estándar, con sus masas en unidades de la energía equivalente, y ordenadas de abajo a arriba desde la de menor masa a la de mayor. Nos va a servir de referencia en la continuación del relato.



Estamos ahora en condiciones como para que al leer los capítulos que siguen no nos sorprenda lo que vamos a ver a lo largo de la historia que iremos despiezando con el paso del tiempo… cómo al ir cambiando las condiciones ambientales medias del Universo van apareciendo progresivamente nuevas posibilidades de equilibrios,

tras los que se van a ir consolidando nuevas partículas y se va a ir posibilitando la acción de las fuerzas que conforman nuestra más próxima realidad.

NOTAS DEL CAPÍTULO 08:

1. En el siguiente enlace a Wikipedia tenéis la historia de tan tremendo físico soviético:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9i_S%C3%A1jarov]

2. Dijimos en el capítulo anterior que el descuadre entre antimateria y materia es de uno frente a diez mil millones.

3. Se cree que su vida media es de unas muchos órdenes de magnitud la edad del universo. Para los amantes de las estadísticas, esa vida media tiene un límite inferior de unos 10^{35} años.

4. Para saber más sobre simetrías propongo una vez más varias entradas del blog "*Cuentos cuánticos*", gracias a los que podréis presumir tomando una cerveza con los amigos de que sabéis discernir perfectamente qué es una simetría en física de partículas. Una artículo básico en el que luce la que nunca sale, la gran *cerebrito* Emmy Noether:

[https://cuentos-cuanticos.com/2016/02/11/emmy-noether-la-mujer-que-nos-enseno-a-repensar-la-fisica-womeninsteam/]

otro artículo general sobre lo que es la simetría:

[https://cuentos-cuanticos.com/2011/10/11/gauge-esto-gauge-lo-otro-%C2%BFque-es-una-teoria-gauge/]

y un tercero más en donde se adentra en la CP y compañeras simétricas:

[https://cuentos-cuanticos.com/2011/07/18/simetria_cpt/]

5. Mediante la palabra **bariogénesis** podrías interpretar que se describe el proceso de génesis de los tipos de bariones. Sin

embargo se trata del término genérico utilizado para referirse a los hipotéticos procesos físicos que produjeron una asimetría entre bariones y anti-bariones durante los primeros instantes de la creación del universo.

6. Hala, a leerse la correspondiente entrada de Pedro en el blog "*El Tamiz*".

   [http://eltamiz.com/2007/08/26/esas-maravillosas-particulas-el-kaon/]

7. Para los más curiosos propongo este enlace al blog "*Naukas*" que amplía el tema:

   [http://francis.naukas.com/2010/07/04/la-asimetria-entre-materia-y-antimateria/]

8. Ya hablamos de ellos en el capítulo tercero de esta serie.
9. De nuevo para mentes curiosas. Esta serie de artículos son bastante ilustrativos de lo que pasa en el interior de protones y neutrones.

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/the-structure-of-matter/protons-and-neutrons/]

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/whats-a-proton-anyway/]

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/whats-a-proton-anyway/checking-whats-inside-a-proton/]

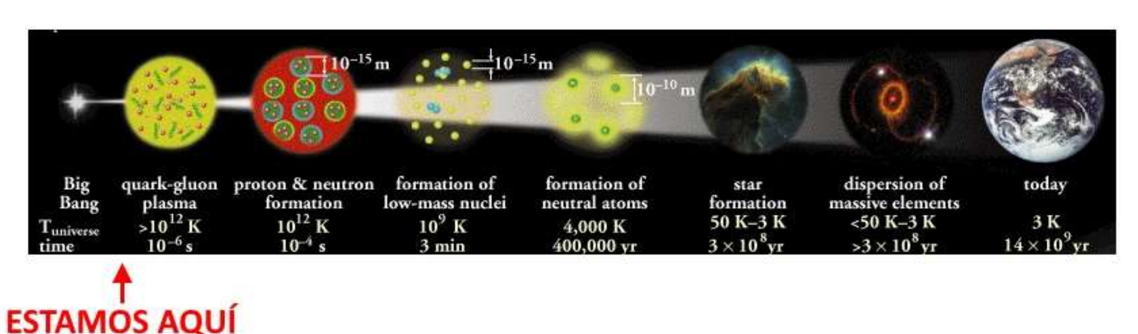
09: Una sopa con mucha radiación

de 10^{-32} a 10^{-12} segundos desde el inicio

Después de una serie de capítulos con contenido más teórico que biográfico, por otro lado necesarias para comprender mejor lo que vamos a leer, proseguimos en éste con el transcurrir de la historia del Universo, que es nuestro objeto último. Volvamos al Universo del tamaño de una naranja, allí por el momento 10^{-32} segundos tras el Big Bang… más o menos. Hay opiniones al respecto del momento concreto del suceso, pero me parece que para nuestra historia del Cosmos son irrelevantes. Sabemos que fue muy al principio y en un momento que se había roto ya lo que postulaba la teoría de la Gran Unificación (GUT), al haberse liberado la fuerza nuclear fuerte de sus dos compañeras, la débil y la electromagnética, que siguieron formando un tándem (la fuerza electrodébil). Gracias al campo inflatón el Universo se había duplicado unas cien veces, tras lo que se había producido un intercambio de cromos: energía interna por materia y radiación, en un entorno de gran densidad y mucha temperatura, 10^{28}K. Tras el recalentamiento habían quedado reliquias de ciertas fluctuaciones cuánticas, las cuales hacían que la distribución energética, o de masas, o de temperatura, que prácticamente es lo mismo, presentara unas tenues irregularidades. Las partículas y la radiación danzante conformaban un plasma por el que se transmitían ondas de presión semejantes a unas ondas sonoras.

Nuestro Universo era joven y, como parece corresponder a la edad, subversivo y alborotador, pero aún tendremos que esperar mucho tiempo para observar en él un cambio sustancial. Al poco de salir de la inflación este plasma violento había atemperado sus turbulencias, continuando su camino, activo y agitado, pero hacia un estado cada vez más asentado en el equilibrio termodinámico. La expansión del tejido base seguía su ritmo persistente, aunque ahora mucho más atemperado. La propia expansión difuminaba los grumos de fluctuaciones cuánticas que, como dijimos, habían aparecido a lo largo de la excursión del campo inflatón hacia su mínima energía.[1]

Así, el cuerpo del Universo se iba transformando paulatinamente en una nube de plasma cada vez más uniforme, conservando el recuerdo de sus irregularidades, sus rincones de mayor o menor energía, reliquias precisamente de aquellas fluctuaciones cuánticas. Por delante le quedaba unos 380.000 años de sopa de partículas y radiación. En realidad, más de lo último que de lo primero.



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Estamos entrando en una nueva era que conocemos como la **época electrodébil,**[2] durante la que va culminando el proceso de **bariogénesis**[3] por el que la que la materia se va a decantar definitivamente frente a la antimateria, permitiendo el nacimiento de los quarks que con el tiempo acabarán formando los protones y los neutrones… en fin, la familia de los bariones.[4] Pero veamos con un poco más de detalle qué pudo pasar a lo largo de esta fase**.** ¿Qué tipo de partículas fueron posibles en aquel escenario?

La teoría nos dice que los antiguos bosones X e Y del Campo Unificado se habían descompuesto en algún tipo de quarks, en positrones, que son la antipartícula del electrón, y en algún tipo de neutrinos. Por lo tanto, en estos momentos ya tenemos presentes en el plasma a algunas de las partículas elementales, quarks y leptones. Además de la radiación existente, los fotones,[5] a los que incluso podríamos asimilar en cierto sentido a los neutrinos. Hay que pensar que gran parte de la población se estaría produciendo por choque de fotones, generándose cualquier partícula de las familias de quarks y leptones en parejas de materia-antimateria. No durarían mucho, ya que las partículas se aniquilarían rápidamente con sus antipartículas, generando de nuevo fotones. En todas ellas, dado el nivel energético medio entre 10^{25} y 10^{12} eV sobre el que estaba cabalgando el

Universo, esto sería lo más común: paso de partículas a radiación y a la vez de radiación a partículas, en las proporciones precisas para que en el plasma hubiera lo que llamamos un equilibrio térmico, es decir, siempre el mismo número de partículas, siempre el mismo número de fotones, y ambas poblaciones iguales.

(energía) Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula (materia)

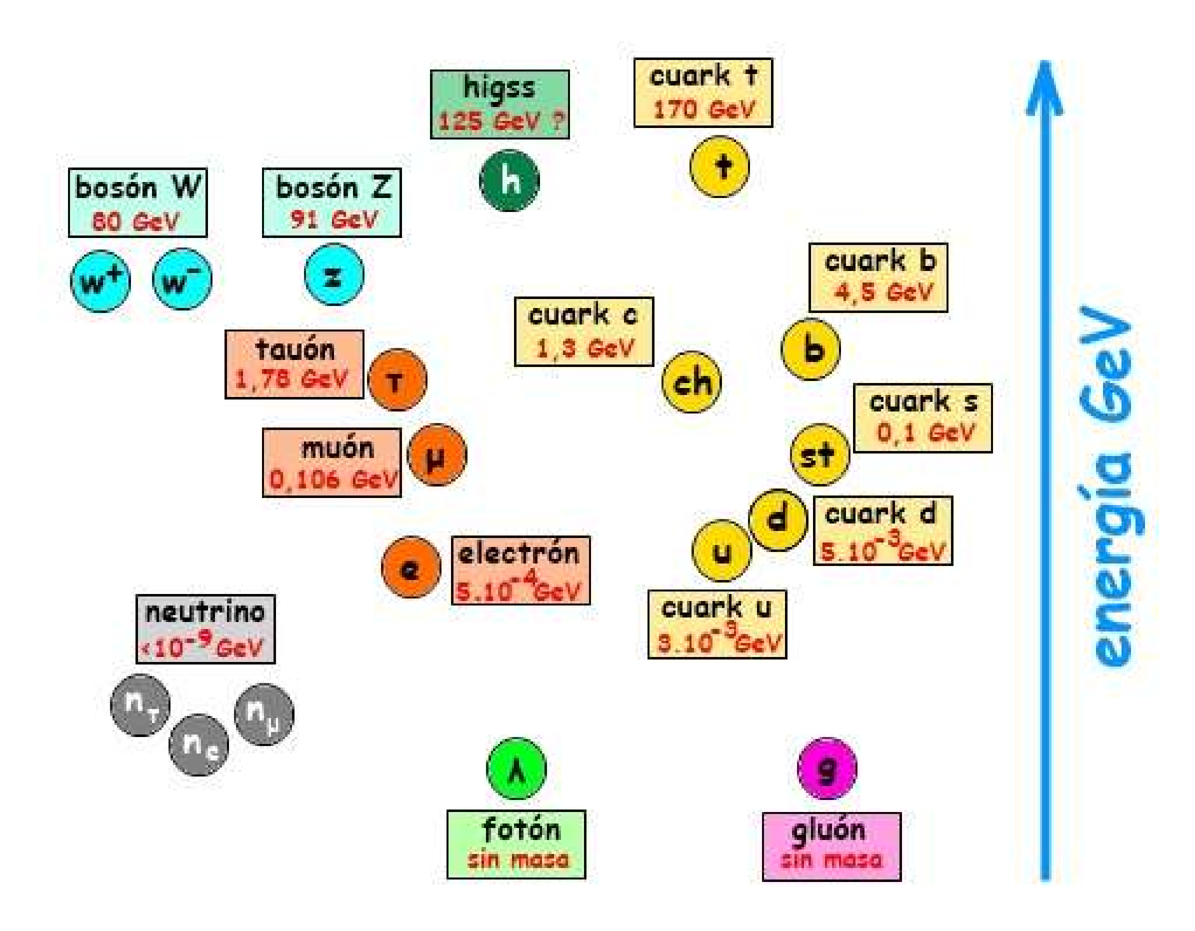
Podemos también preguntarnos si en aquel marasmo de energético plasma pudiera haber otras cosas, como sub-partículas de estos quarks elementales. La respuesta es clara… no lo sabemos. Ni siquiera sabemos si existen ¿Y partículas más pesadas? ¿O compuestas por los elementales quarks? Había energía más que suficiente, aunque no tenemos evidencias de partículas súper-pesadas. Por ejemplo, como las que se postulan en la teoría de la supersimetría, coloquialmente conocida como SUSY,[6] que entre otras cosas dice que cada partícula fermión tiene una pareja bosón, y que a su vez cada bosón tiene una pareja, que es un fermión. Parejas que, o bien son ambas de materia, o bien ambas de antimateria. Si en aquel momento estaban participando en el equilibrio térmico, no tenemos forma de saberlo. Bueno, bien, no sabemos casi nada de nada, pero eso no quita que nos preguntemos también si quizás en la época electrodébil estuvieron presentes las partículas teóricas que componen la materia oscura, que forma un 25% de nuestro Universo. La materia oscura es una realidad que podemos percibir por métodos indirectos, aunque no sabemos lo que es, qué la constituye. A estas partículas “oscuras” las hemos llamado wimp -*weakly interacting massive particles-,* entre las que parece podría colocarse el masivo neutralino, nombre genérico para una familia de superpartículas postuladas por la teoría SUSY que podrían tener una masa del orden de unos doscientos protones -200 GeV-, por lo que quizás las podríamos detectar en el LHC. Sean como sean y lo que sean, lo que es cierto es que en algún sitio del plasma de aquellos instantes tendría que estar la materia oscura.

Pero no hace falta ir tan lejos en las nebulosas de la ignorancia, porque nos podemos preguntar por partículas que conocemos mejor, como son los bariones -el protón y el neutrón-, ambos con unas masas en reposo en el entorno de 10^9 eV (es decir, 1 GeV). ¿Estarían en

aquel plasma? ¿o quizás… incluso podríamos ver núcleos atómicos? En ambos casos sí tenemos una respuesta: es imposible que este tipo de partículas o de conglomerados de partículas estuvieran ya presentes en el plasma. ¿Por qué? Porque para que pudieran formarse a partir de las partículas más elementales, los quarks, tendríamos que tener operativas a nuestras fuerzas fundamentales. Y esto aún no era así, como vamos a ver al revisar en que situación se encontraban los respectivos campos de las fuerzas.

Para empezar por lo fácil, **[A]** la *gravedad* siempre ha sido debilísima en comparación a la presión de la energía del momento, pero ahí estaba operativa desde el principio, aunque no influye directamente en la generación de partículas. **[B]** La *fuerza nuclear fuerte* que ya había aparecido como una entidad propia, y que es la que une a los quarks para formar hadrones, se veía impotente, ya que como fuerza sólo puede actuar en las cortísimas distancias: a 10^{-15} metros esta interacción ya es despreciable. Por eso en aquellos momentos de grandes velocidades y grandes energías, el campo fuerte y su bosón gluón siempre llegaban tarde para unir a algunos quarks acelerados. Antes de acercarse lo suficiente entre ellos y sentir el mensaje del gluón, el violento choque ya los había dispersado. En cuanto a las otras dos fuerzas conocidas, **[C]** la *nuclear débil* y **[D]** el *electromagnetismo*, seguían siendo indistinguibles y no sabemos muy bien cómo interactuaría su campo electrodébil con la materia, pero podemos suponer que también se verían inútiles para desarrollar sus cometidos. Hoy se manifiestan a través de la desintegración beta de los quarks y por la atracción-repulsión electromagnética entre cargas. Para lo primero se necesitaban unos bosones intermediadores W y Z, **con masa**, y por aquel entonces aún no podía acudir en su ayuda el campo de Higgs -el responsable de las masas de las partículas elementales-, que no rompió simetrías hasta que el Universo llegó a niveles energéticos de alrededor de 10^2 GeV. Para la segunda interacción, las reacciones entre cargas eléctricas, la dificultad estribaba en que la velocidad de las partículas cargadas no permitía establecer relaciones de proximidad suficientemente duraderas como para que la fuerza, un poquito lenta ella, pudiera desperezarse y actuar. Pensad que la energía del electrón que orbita un protón en el hidrógeno es del orden de los 17 eV, y es el resultado de la atracción

entre las cargas de ambas partículas. Nada que hacer a lo largo de una época que terminó con una energía del orden de 10^3 GeV. Así que nada de protones o neutrones, y mucho menos núcleos atómicos.



Para que sirva de recordatorio volvemos a presentar la nómina de partículas del modelo estándar. El valor de la energía que aparece al lado de cada uno es la equivalente a sus masas en reposo (E= mc^2). En la época electrodébil se estaba viviendo un entorno energético entre 10^{25} y los 10^{12} eV.

En resumen, más allá de lo que podamos teorizar con partículas exóticas masivas que pudieran aparecer -y desaparecer casi al instante- en episodios de inestabilidad cuántica, tenemos que imaginar más bien un plasma con partículas sin masa, que en aquel momento estaría constituido por todos los bosones intermediadores de fuerzas, más las partículas elementales bariónicas, como los quarks y la pareja de leptones formado por el electrón y el ligerísimo neutrino. Todos ellos serían los personajes del **mundo electrodébil**, cuyos volúmenes de población seguían una dinámica.

Recordemos que el Cosmos estaba en expansión, circunstancia que hacía que la radiación existente se fuera difuminando en un volumen cada vez mayor y además sus partículas -los fotones-, debido a la propia expansión del tejido soporte iban también "estirando" la longitud de sus ondas. Lo cual implicaba que las partículas de la radiación eran cada vez menos energéticas y, en consecuencia, el Universo más frío.[7] A las reacciones de aniquilación materia-antimateria[8] la circunstancia puede que le fuera completamente indiferente y seguirían generando incansables nuevas partículas de radiación. Sin embargo, si miramos en el otro sentido de la reacción -la de creación de pares materia-antimateria por choque de radiación-, tenemos que pensar que se iría progresivamente ralentizando, al ser los fotones cada vez menos energéticos.[9] Por ello, el equilibrio térmico se iba progresivamente deshaciendo a favor de los fotones. En resumen, se estaba viviendo una progresiva marcha hacia una situación de más fotones y comparativamente menos partículas de materia. Esto lo podemos observar a día de hoy, de forma que lo que realmente contabilizamos en el Cosmos es que hay mil millones de fotones por cada protón-neutrón, que además son prácticamente todos de materia salvo alguno de antimateria.

¿Sólo ***alguno*** de antimateria? Ya sabemos por los dos capítulos anteriores de esta serie, el 7 y el 8, que la falta de simetría en la desintegración de las partículas X e Y cuando el Universo tenía temperaturas muy altas produjo el desequilibrio entra bariones y antibariones, de forma que por cada 10^9 parejas de "bariones" y de "antibariones" -y 10^9 fotones-, tenía que haber UN "barión" más. Pero ¿por qué aún detectamos antimateria, poca, pero *alguna*? ¿No tendría que haber desaparecido en la aniquilación mutua entre aquellas 10^9 parejas? La explicación es fácil de imaginar, y nos la da la expansión acelerada, que hizo que alguna de las parejas materia-antimateria que se fueron creando se separaran con tal rapidez que les fue imposible reencontrarse y contrarrestarse.[10] Todo ello está inmerso en el núcleo conceptual de la **bariogénesis**, es decir, el proceso de nacimiento de los "bariones" que observamos. En el intervalo temporal que se describe en este capítulo afectaba a las partículas elementales quarks. Con posterioridad lo hará con los

auténticos bariones -protones y neutrones- compuestos por aquellos quarks que sobrevivieron.

Con esto cerramos un intenso periodo de la vida de nuestro Universo, que fue extremadamente corto, entre el tiempo 10^{-32} segundos a 10^{-12} segundos desde su inicio. Este final del periodo va a coincidir con el momento en que la fuerza electrodébil rompa su simetría -hablaremos de ello en el siguiente capítulo- y comiencen a actuar como fuerzas diferenciadas el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil. Es el momento energético en que pudo condensarse ya el bosón de Higgs, que hoy sabemos que existe gracias a que lo hemos detectado a través de los experimentos en el LHC. Aquella naranja de unos 10 centímetros de diámetro del inicio habrá crecido en un factor de 10^{11}. En su interior, un plasma de fermiones elementales del tipo quark, electrón, neutrino, muon y tauón, así como bosones del tipo gluón o el específico del campo electrodébil -en aquellas condiciones el fotón y los bosones W y Z debían ser indistinguibles, los tres sin masa y moviéndose a la velocidad de la luz ¡la radiación del momento!-. Todas esas partículas con sus correspondientes antipartículas, que iban siendo cada vez más residuales. Y aunque no sabemos nada de ellas, tenían que estar también presentes las partículas que teorizamos como las que conforman la materia oscura, tales como los axiones o los neutralinos.

Vamos a acabar este capítulo para continuar en el siguiente con la historia de un Universo que era un mundo de plasma dominado por una energética y abundante radiación, que no dejaba tranquilos ni a los campos de materia ni a los de fuerzas. Un mundo en continua expansión y, por tanto, enfriamiento, con un comportamiento físico semejante a un mundo de gas opaco, en donde la "luz" -la radiación- no era libre y en donde las perturbaciones se comportaban como **ondas sonoras**, aunque con frecuencias que quizás ningún hombre, si allí hubiera podido introducir un micrófono, hubiera sido capaz de percibir con su oído y su cerebro. Pero las había, ondas sonoras inherentes a los flujos de compresión-expansión que experimentaba el plasma. Físicamente un fenómeno idéntico al que experimentamos cuando un foco sonoro emisor produce ondas en el medio físico, el gas atmosférico, que se transmiten por él hasta llegar a nuestros oídos

receptores. Aunque me estoy adelantando… dejemos esto como un anuncio de un tema que desarrollaremos en otro capítulo, cuando estemos sobrepasando la frontera de los 380.000 años. Nos leemos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 09:

1. Podéis repasar el tema releyendo el cuarto capítulo de este libro.
2. Recordemos cómo ya se había roto la simetría GUT, separándose la interacción nuclear fuerte de la interacción electrodébil. De ahí el nombre.
3. Recordemos que este concepto se desarrolló en el capítulo anterior 08 y que, de forma diferente a lo que parece sugerir el nombre, se trata del proceso mediante el cual la materia dominó a la antimateria.
4. Recuerdo aquí otra vez lo útil de leer la serie del blog "*El Tamiz*", "*Esas maravillosas partículas*":

   [http://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]

   o bien releer el capítulo 07 de este libro.

5. Realmente los fotones como tales aún no existían. Sí que habría en su lugar una partícula intermediadora del campo electrodébil que más tarde, gracias a la interacción con el campo de Higgs, generó a cuatro hijas: tres para el campo débil y nuestro conocido fotón para el electromagnético.
6. Si tenéis más curiosidad sobre este tema de la supersimetría podéis leer este artículo del blog "*Cuentos Cuánticos*":

   [https://cuentos-cuanticos.com/2011/09/01/supercosas/]

   o éste otro más técnico, aunque en un buen porcentaje comprensible para los neófitos, aparecido en el blog "Naukas":

   [http://francis.naukas.com/2012/12/29/el-modelo-estandar-la-supersimetria-y-la-supergravedad/]

7. La energía implícita en una onda es directamente proporcional a su frecuencia y, en consonancia, inversamente proporcional a su longitud de onda.

8. Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula

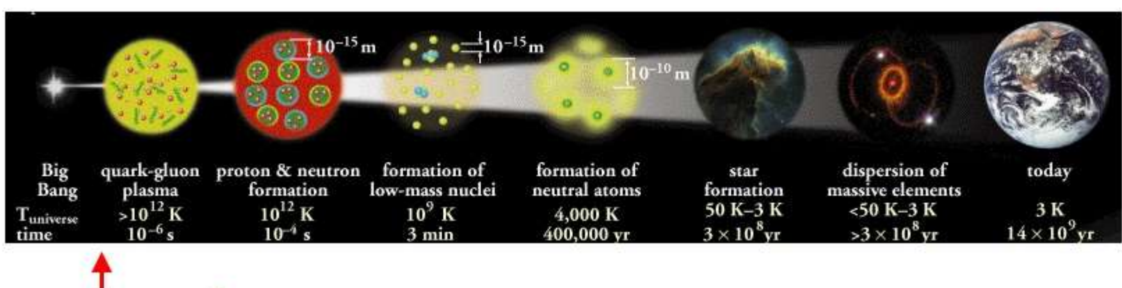
9. Como sabemos, la energía va decayendo por debajo de la masa de las posibles partículas, masa que es equivalente a energía según la famosa igualdad $e=mc^2$.

10. Hay otras teorías que conjeturan la hipótesis de que en el Universo, y fuera del observable por nosotros, podría encontrarse una “burbuja universo” de antimateria, el complementario al nuestro.

10: La liberación de la fuerza débil I

de 10^{-12} a 10^{-6} segundos desde el inicio

Llegó el momento $t=10^{-12}$ segundos desde el principio. Comienza la **época electrodébil**. Espero que al final de este capítulo se entienda por qué se llama así. En estos momentos de la historia del Cosmos nuestro personaje había estirado sus estructuras desde la época del recalentamiento en un factor de 10^{10}. Aunque el tamaño total del Universo es un arcano, podemos hacer uso de la imaginación y pensar que la naranja que surgió de la inflación pudo pasar a ser una “esfera” de unos mil millones de kilómetros: el campo de juego en aquellos tiempos cabría entre el Sol y Júpiter. En esta inmensidad pongamos una cabeza de alfiler de medio milímetro de diámetro ¿lo véis? pues eso que creéis ver es justamente lo que ocupaba el universo observable, habían pasado 10^{-12} segundos y la luz sólo podía haberse desplazado el radio de esta esferilla.[1] Aquella pequeña naranja que fue en el momento 10^{-32} segundos ahora había crecido y, aunque menos que entonces, aún seguía siendo un mundo denso, muy denso, 10^{25} veces más denso que el agua de nuestras piscinas.



(Imagen a partir de “The Nuclear Wall Chart”, Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Habíamos quedado al final del capítulo anterior que los habitantes de tan apretado barrio eran los bosones, tales como los gravitacionales gravitones -si realmente existen, porque aún no los hemos visto-, los electromagnéticos fotones y los gluones y bosones W y Z de las fuerzas nucleares.[2] También revoloteaban por allí los bosones de

Higgs, no sabemos si de cuatro tipos o quizá más: todo depende de la imaginación de los físicos matemáticos. También estaban presentes las "partículas" de la materia, los "fermionosos" quarks, electrones, neutrinos y alguno más. Y no me gustaría olvidarme que nuestro mundo es como es gracias a la materia oscura, así que tenemos que añadir al cóctel las posibles partículas asociadas, quizás los axiones o quizás los neutralinos, aunque no tengamos ni idea de lo que son.

A excepción de los bosones de Higgs, todos tenían una característica que los hacía diferentes a como los vemos en nuestros días: **no tenían masa**, o quizás muy poca, del orden de la de los neutrinos. Lo cual quiere decir, como nos ilustró Einstein, que se desplazaban a la velocidad de la luz o muy próxima a ella. Así había sido desde el principio.

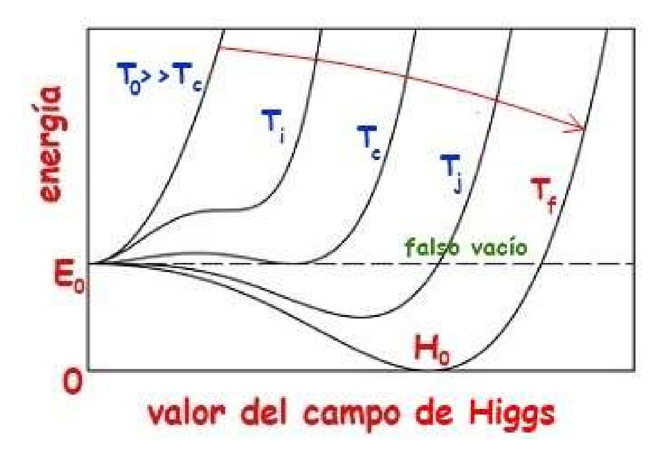
Más o menos en estos momentos cósmicos sucedió algo decisivo para nuestro mundo tal como lo observamos, tal como vemos de qué forma somos realmente nosotros. A energías medias por partícula de 10^3 GeV y con una temperatura de 10^{15}K, el campo de Higgs condensó, rompiendo una vez más la simetría del Universo: el campo electrodébil se separó en dos y generó en el proceso al campo electromagnético y al nuclear débil, que hasta entonces se habían manifestado como una misma cosa. Lo había predicho el Modelo Estándar para energías de unos 246 GeV.

¿Qué quiere decir que se separaron? ¿Qué es lo que pasó? El campo de Higgs que se acababa de condensar[3] alcanzó la posibilidad de excitarse en su forma fundamental, lo que era lo mismo que generar un bosón de Higgs en el nivel de 125 GeV, al que ya hemos detectado en el Large Hadron Collider (LHC). Tenemos que pensar que al unísono comenzaría a acoplarse con el campo electrodébil, lo que hizo que de los cuatro bosones que "históricamente" se generaban a altas energías en las excitaciones de este último campo, X_1, X_2, X_3 y B,[4] adquirieran masa tres de ellos, mientras el cuarto siguió con el mismo carácter de "cero masa" que había tenido hasta entonces. Gracias a estos bosones X, a los que llamaremos a partir de este momento en que adquieren masa bosones W^+, W^- y Z^0, la fuerza nuclear débil pudo comenzar a interactuar con los campos de partículas elementales: quarks, electrones, etc., mientras que la fuerza

electromagnética se quedó para ella con el bosón B, sin masa, al que realmente a partir de este momento se le puede llamar propiamente fotón.

Veremos en los siguientes capítulos lo trascendental que fue este cambio de rumbo. El bosón gluón intermediador de la fuerza nuclear fuerte podrá unir quarks y así generar partículas tan importantes como el protón o el neutrón. Los bosones W y Z podrán apoyar las transmutaciones de unas partículas en otras, como por ejemplo de protones a neutrones o viceversa, o desintegrar a los neutrones, reacciones que fueron decisivas en el momento en que se fijaba la densidad de distribución de los elementos químicos en el Universo… o en los procesos de fusión nuclear en el interior de las estrellas. Mientras que el fotón podrá intermediar por sí solo entre cargas eléctricas, permitiendo la creación de átomos… ¡¡¿Fue importante el momento o no?!!

Una vez presentado el argumento, reflexionemos un poco. Cosas como las mencionadas en el párrafo anterior ya surgían como consecuencia del propio Modelo Estándar pero, como ya hemos comentado, se precisaba de la existencia de un campo muy especial, hermano quizás de nuestro conocido inflatón: el campo de Higgs. ¿Qué le pasó a este último cuando la energía promedio de las partículas del Universo había descendido hasta los 10^3 GeV?



¡Esta figura me suena!, dirás. Y tienes toda la razón. Viste una casi igual en el capítulo cuarto, en el que hablábamos del campo inflatón. La diferencia está en que ahora en vez de leer inflatón estás leyendo Higgs. Si, la base teórica de los dos funciona igual.

El campo de Higgs permeaba desde siempre toda la extensión del espacio-tiempo. A medida que iba descendiendo la temperatura del Cosmos, la curva del campo Higgs, la que dibuja la correlación entre el propio valor del campo y el de su energía, atemperaba su forma dibujando con el transcurrir del tiempo una especie de “aleteo”, como hemos intentado dibujar en la superposición de instantáneas fijas que es la figura anterior, en donde la flecha roja es la del tiempo. Y esto era lo mismo en todos y cada uno de los puntos del homogéneo Universo. A altas temperaturas, la curva identitaria del campo se ajustaba bastante bien a una parábola. En estas condiciones el campo de Higgs se habría situado en el fondo de mínima energía de esta parábola, en donde se encontraba en una posición relativamente precaria: con el paso del tiempo, estar en este mínimo energético, E_0, no podía ser una situación muy estable, ya que este valor no era el que marcaba la referencia de energía cero para el resto del Universo, pues había niveles de energía menores. Al ir bajando aún más la temperatura, la curva característica se fue modificando hacia otro tipo de curvas de cuarto grado, deslizando su contorno de forma que, a medida que transcurría el tiempo, se posibilitaban nuevos puntos de mínima energía, cada vez menor. Todo ello hacía que mantenerse en el punto E_0 de energía no-cero, fuera cada vez más difícil para el campo. En ese punto (0, E_0) el campo de Higgs se encontraba, a medida que transcurría la expansión del Universo, en una situación que progresivamente era más inestable. Paulatinamente iba creciendo el termodinámico “impulso”[5] a colocar al campo en estos nuevos mínimos de energía, fuera del pozo del **falso vacío** en el que se había instalado desde los inicios. Como le había sucedido al campo inflatón hacía muchos electronvoltios, aunque realmente muy, muy poco tiempo, nuestro campo de Higgs inició **en todos los puntos** del Universo homogéneo e isotrópico una excursión hacia el **verdadero** mínimo de energía. Hasta que llegó al nuevo estado de equilibrio en un vacío real de energía nula con un valor de campo H_0. En todos los puntos del espacio-tiempo dejó de tener un valor promedio cero para establecerse **en todos los puntos del espacio-tiempo** un valor H_0.

¿Por qué pasan este tipo de cosas? Voy a intentar explicarlo en los párrafos que vienen, una digresión teórica referente a lo que hemos dicho que pasó con el campo de Higgs. Una explicación muy simple,

espantosamente simple aunque creo que clara, de por qué creemos que sucede esta dinámica en algún tipo de campo.[6]

Aunque ahora que lo pienso… llegado a este punto del escrito observo que lo que acabo de prometer me va a meter en un tinglado un poco largo, por lo que será fácil que se alargue el capítulo más de lo que parece juicioso y soportable… ¡Una vez más! Así que como creo que éste puede ser un buen momento -o al menos el menos malo- para la interrupción del transcurso de la argumentación, propongo hacer un parada técnica para recuperar el hilo en el próximo capítulo. Allí continuaré con esa "espantosamente simple" explicación. Hasta entonces.

NOTAS DEL CAPÍTULO 10:

1. Como universo observable entendemos a una región parcial del Universo total, una esfera con nosotros de observadores en el centro en la que la luz emitida por los puntos frontera más exteriores ha tenido tiempo de llegar hasta el centro de la esfera. Lo que quiere decir que estos puntos frontera se encuentran a una distancia tiempo-luz de nosotros igual a la edad del Universo en el momento. Hoy su edad es de 13.800 millones de años-luz, que ampliados por el efecto de la expansión equivalen a unos 5×10^{23} kilómetros de radio de la esfera observable. El resto del Universo es inalcanzable.
2. Realmente en esta época los fotones y los bosones W y Z eran indistinguibles. Habría que esperar todavía un poco a que el campo de Higgs hiciera sus diabluras y los diferenciara.
3. Lo de *condensar* es otra pequeña alegoría de que la interacción de Higgs comenzaba a ser una realidad.
4. Aclaración: estos bosones X no tienen que ver con aquellos del campo de la gran unificación.
5. A este impulso se le conoce como el "principio de energía mínima", que esencialmente declara que para un sistema cerrado, sin que los parámetros externos -como el volumen- varíen, la energía interna disminuirá y se acercará en el equilibrio a un valor mínimo.

6. Si queréis un poco más de profundidad entendible os recomiendo que leáis estas dos entradas del blog “*Of particular significance*”. La primera, general sobre la interactuación entre campos relativistas enlazados y la segunda, que se apoya en la anterior, para explicar matemáticamente cómo Higgs induce masa en otros campos que en principio no tenían.

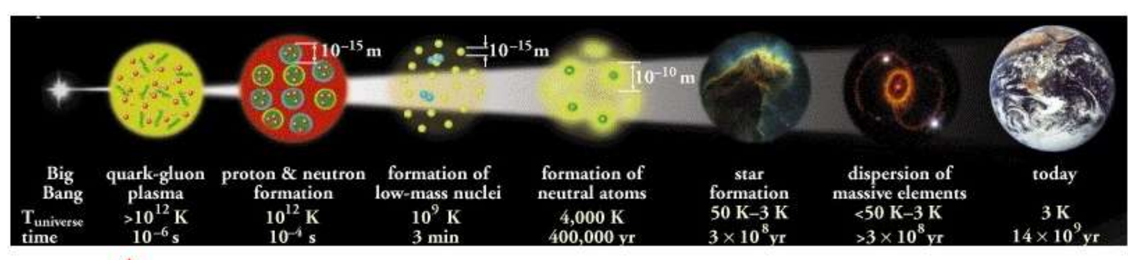
[https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]

[https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/how-the-higgs-field-works-with-math/1-the-basic-idea/]

11: La liberación de la fuerza débil II

de 10^{-12} a 10^{-6} segundos desde el inicio

Al final del capítulo anterior me había tomado la licencia de interrumpir lo que allí habíamos empezado acerca de la liberación de la fuerza nuclear débil, en la época que conocemos como electrodébil. La energía del Universo había descendido hasta niveles adecuados para que pudieran suceder dos cosas muy trascendentales para su futuro: la “condensación” de la partícula Higgs y la consiguiente rotura del campo electrodébil.





(Imagen a partir de “The Nuclear Wall Chart”, Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Allí habíamos comentado los correspondientes detalles y nos habíamos quedado en una descripción teórica de cómo Higgs pudo engendrar una masa en las partículas elementales. Recuperemos algún párrafo que nos enlace con lo de hoy.

“¿Por qué pasan este tipo de cosas? Voy a intentar explicarlo en los párrafos que vienen, una digresión teórica referente a lo que hemos dicho que pasó con el campo de Higgs. Una explicación muy simple, espantosamente simple, aunque creo que clara, de por qué creemos que sucede esta dinámica en algún tipo de campo.” [1]

Los campos relativistas transportan energía e información a lomos de sus ondas-partículas de un punto a otro del Universo. Estas ondas pueden afectar a las ondas de otro campo, con la consecuencia de que

se puede modificar alguna de sus características físicas, cosa que no hubiera pasado sin el influjo del primero. Según la mecánica cuántica, la ecuación de onda que definen a los campos generalmente adopta la siguiente forma matemática:

$$\mathbf{d^2\Phi / dt^2 - c^2\, d^2\Phi / dx^2 = -\,[K_1\, \Phi + K_2\, f(\Omega,\beta,\theta,\ldots)]}$$

En esta ecuación $\mathbf{d^2\Phi / dt^2}$ es la variación de la variación del campo Φ [2]; **c** es la velocidad de la luz; $\mathbf{K_1}$ [3] es una constante que *tiene que ver con la masa de la partícula fundamental del campo Φ* y $\mathbf{K_2}$ tiene que ver con la fuerza de acoplamiento entre el campo Φ y los que intervienen en la función última f(Ω,β,θ,…), que puede depender de uno o varios campos -Ω,β,θ,…-, e incluso del propio campo Φ**.** Dicho lo anterior no nos asustemos… voy a traducir la ecuación a palabras, que creo resultará más comprensible.

La dinámica espacio/temporal de un campo cuántico relativista Φ

es, de alguna manera, función de

los cuantos de energía específicos del campo, es decir, "la masa de sus partículas"

y de

"la fuerza de interrelación" con otros campos

Lo cual no parece ser el descubrimiento de la pólvora: la historia de cualquier cosa depende de su propia forma de ser y de cómo interactúa con su medio. Hasta el momento en que se inició el proceso que estamos empezando a estudiar, el correspondiente a un nivel de energía media en el Universo de 10^3 GeV, los campos existentes -los que correspondían a las partículas elementales quark, electrón, muón, tauón, neutrino y bosones- no generaban partículas con masa. Menos el campo Higgs, que él mismo, y aún no sabemos muy bien el porqué, creaba su propia masa. Vamos a intentar plasmar estas dos "personalidades" con la fórmula inicial de los campos que ahora ya entendemos mejor.

Por ejemplo, ésta es la que rige la vida de un quark sin masa → $\mathbf{d^2Q / dt^2 - c^2 d^2Q / dx^2 = - K_2 f_Q(Q,H)}$ *(no tiene el sumando de* K_1*)*

y ésta es la que rige la vida de Higgs con masa → $\mathbf{d^2H / dt^2 - c^2 d^2H / dx^2 = - [K'_1 H + K'_2 f_H(Q,H)]}$

Lo curioso es que en algún caso particular, cuando el campo del tipo de Higgs está en la situación en la que ha llegado a un vacío verdadero adquiriendo un valor H_0, *la ecuación anterior correspondiente al quark Q* (que debemos generalizar a la mayoría de las partículas elementales del modelo estándar), en los puntos donde se produce una interrelación entre este campo de Higgs **H** y el campo **Q**, *se transforma adoptando esta nueva expresión*:

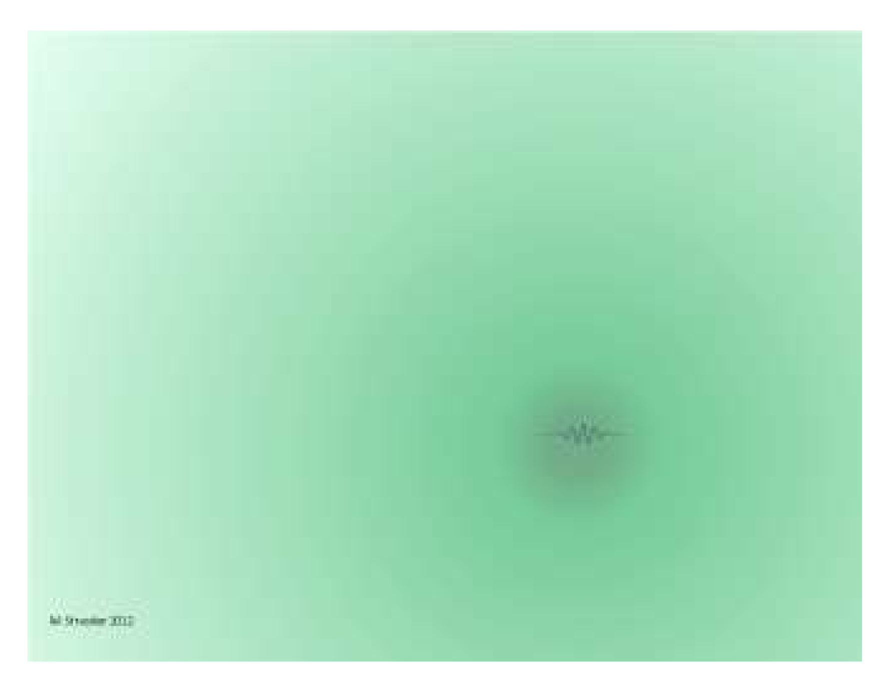
$$\mathbf{d^2Q / dt^2 - c^2 d^2Q / dx^2 = - [K'_1 H_0^2] \, Q = - K_1 Q}$$

Ha aparecido como de la nada un **nuevo término lineal en Q** que he resaltado en rojo, un nuevo K_1 que, como hemos dicho más arriba, tiene que ver con la masa de la partícula fundamental del campo Q. No, no es magia: **La interrelación de excitaciones, ondas/partículas, entre los campos Q y H ha generado masa en el campo Q**. Simplemente por curiosidad, diremos que la masa que aparece de "*ex novo*" es la siguiente:

$$\mathbf{m_Q = (K'_1)^{1/2} [h/2\pi c^2] \, H_0}$$

Según la fórmula anterior de la masa de las partículas más elementales, ésa depende de la fortaleza de la interacción del campo Higgs con los correspondientes campos, K'_1, y del valor promedio del campo Higgs en el universo, H_0. De nada más. Lo que nos dice que **la masa inducida depende del campo de Higgs y no de su partícula**: si el campo de Higgs tuviera un nivel base de su potencial igual a cero, no induciría ninguna masa en las partículas de los otros campos. Y, sin embargo, el propio campo de Higgs seguiría teniendo sus partículas, que no serían más que las mínimas ondas vibratorias, sus cuantos de energía, posibles del mismo. Hay que añadir que el campo de Higgs no debe ser el único responsable de generar masa en las partículas elementales del Universo, incluso la propia masa de su partícula. Creemos que debe haber otros mecanismos en el Cosmos

que también inducen en algunas partículas la característica que llamamos “masa”, su habilidad para ejercer resistencia al movimiento, aunque realmente no sabemos lo que puedan ser.



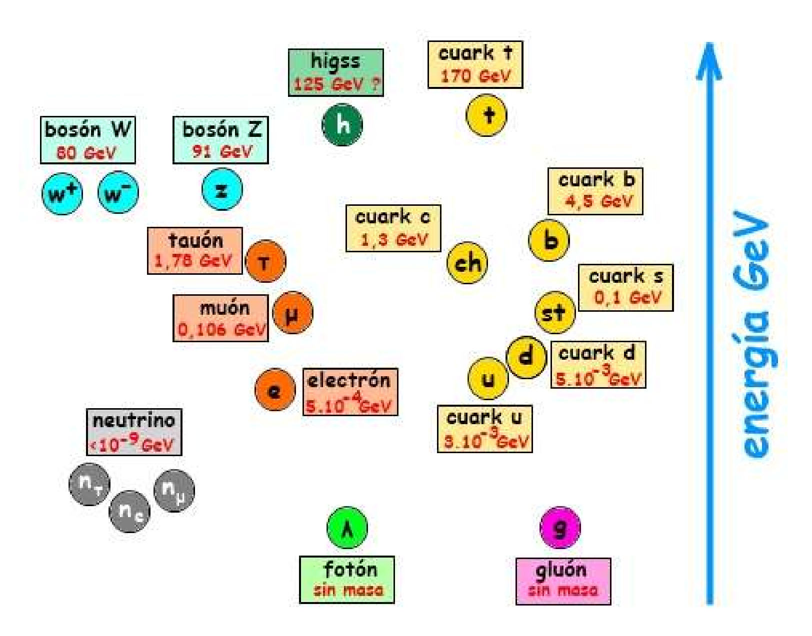
Un bosquejo de cómo interactúan dos campos. En el texto se explica cómo interpretarlo (Imagen: Matt Strassler, fair use)

En la imagen anterior se intenta explicar de forma gráfica lo que acabamos de explicar, es decir, cómo se influyen los campos cuánticos relativistas entre sí. Uno, que podemos suponer como el campo quark, está inicialmente en reposo y permea con su color verde pálido uniforme a todo el espacio. Un segundo campo que coexistía con el anterior en el mismo espacio, y que podemos suponer el Higgs, sufre una excursión energética en un punto, apareciendo un cuanto, una onda-partícula -la especie de muelle azul-, con mayor energía que la de base del campo verde quark. Ambos campos pueden interrelacionarse con una determinada fuerza… y de hecho en este croquis lo hacen. Se puede observar cómo, al interactuar los dos, en el campo verde se incrementa la energía -se oscurece el verde- con un gradiente que lo hace más verde cuanto más cerca del cuanto del campo azul, difuminándose progresivamente hacia el color pálido inicial en las distancias más alejadas. Puede llegar el caso de que si el campo azul es lo suficiente potente -y ahí podemos pensar en Higgs montado en su H_0- inducirá una mayor excitación en el campo verde,

generando en él un cuanto propio de energía, la onda-partícula característica del campo verde. En nuestro ejemplo un quark.

Dicho lo anterior, pura teoría, volvamos al escenario. En el Universo todo seguía más o menos según los viejos parámetros. Había energía suficiente para que ahora ya, roto el campo electrodébil, el recién estrenado y libre campo electromagnético siguiera generando perturbaciones en el resto de campos de partículas: ya sabemos que por choque de fotones lo suficientemente energéticos se van generando nuevas partículas,[4] cuyas masas serán iguales o menores que la suma de energías de los fotones madre.

Podemos seguir en la figura siguiente -ya conocida por nosotros- el elenco de personajes que habitaban el teatro del Cosmos. En ella se recoge el conjunto de partículas que postula el Modelo Estándar, cada una con su energía de "condensación", es decir, su masa en reposo en GeV.[5] Si el nivel de energía promedio en el Universo está por encima de este valor, aún se genera la partícula a partir del choque de los fotones. Si está por debajo va disminuyendo este proceso, mientras que su contrapartida negativa, que supone la aniquilación partícula-antipartícula, hace que su población abandone el viejo equilibrio térmico. Podemos decir que las partículas que a pesar de todo permanecen han alcanzado una posición de madurez y estabilidad en la que estarán sujetas a otro tipo de interacciones.



Hagamos una vez más la foto fija del momento. Cualquiera comprendido entre 10^{-12} y 10^{-6} segundos tras el Big Bang. La sopa de partículas estaba constituida por las tres familias de los quarks, electrones y neutrinos, los bosones de los cuatro campos de fuerzas más el de Higgs y las partículas hoy por hoy desconocidas que formarán en un futuro la materia bariónica oscura. La energía de "condensación" de estas últimas, según las teorías de la supersimetría SUSY que las conoce con el nombre genérico de neutralinos, pudiera estar en el entorno de 30 a 5.000 GeV -la apuesta más cotizada es la de los 200 GeV-, justo en el rango del periodo que estamos analizando en este capítulo.

Todo ello constituía un plasma denso que se conoce con el nombre del **plasma quark-gluón**, simplificación del momento y esencia de lo que iba a venir. Este plasma estaba dibujado por una textura de "viruelas", reminiscencia de las atemperadas fluctuaciones cuánticas que se produjeron en los momentos más álgidos de la expansión inflacionaria. Este plasma también estaba manteniendo la dinámica de las ondas sonoras que "arrugaban" su esencia, la densidad de partículas y energía, al igual que un instrumento musical al emitir una nota "arruga" el aire en la densidad de su mezcla de gases produciendo una onda sonora. Sin olvidarnos del hecho de la existencia de las ondas gravitatorias predichas por Einstein,[6] consecuencia de las tremendas variaciones de masa generadas al culminar la inflación, y que también seguían produciendo el arrugamiento del tejido espacio-temporal en el mundo del plasma quark-gluón.

De la misma manera, en este escenario estaba presente el alma de la función, las fuerzas fundamentales que ponen en juego la dinámica de la materia y la radiación. Todas las partículas existentes quedaban al alcance de cualquier campo de fuerzas existente, aunque quizás en aquellos momentos el nivel térmico del Universo sólo les permitía ser eficaces por debajo de una cierta temperatura, que es lo mismo que por debajo de una cierta energía cinética de la partícula.

La *gravedad*, vieja actriz. Su presencia se manifestó desde el verdadero principio del Big Bang. Y aunque las partículas acababan de dejar de ser casi pura radiación sin masa, no cabe duda de que su

energía de masa y cinética deformarían levemente el tejido espacio-temporal, lo cual inducía en ellas sutiles cambios de trayectoria.

El *electromagnetismo* también estaba presente. En esta época los fotones comenzaron a ser libres, por lo que ya podían ejercer su mediación entre las cargas eléctricas. Así que en el momento en que las partículas cargadas frenen sus velocidades, y de eso se encargará la incansable expansión, tendrán ya la oportunidad de unirlas: allí estaban en la brecha quarks y electrones. Aunque aún tendrán que esperar.

La *fuerza nuclear fuerte* era independiente desde hacía "mucho". Pero ella sabe actuar sobre quarks y gluones. Por fin los primeros se habían "condensado" lo que les daba una cierta estabilidad temporal, lo suficientemente prolongada como para posibilitar las interrelaciones. Pero para ver los efectos de la fuerza nuclear fuerte deberemos esperar hasta un nivel de energía del orden del GeV ¡y estamos a 10^3 GeV!

Por último, la *fuerza nuclear débil* también estaba presente: Los bosones W y Z, ya con masa, podían intermediar en las reacciones de desintegración β por la que los quarks cambian su "color". Eso iba a permitir, entre otras cosas, el transmutar protones por neutrones y viceversa. Veréis la importancia de ello dentro de unos capítulos.

Aunque esto va a ser el siguiente paso de nuestra historia. Cosa que veremos en el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 11:

1. Si queréis un poco más de profundidad entendible os recomiendo que leáis estas dos entradas del blog "*Of particular significance*". La primera, general sobre la interactuación entre campos relativistas enlazados y la segunda, que se apoya en la anterior, para explicar matemáticamente cómo Higgs induce masa en otros campos que en principio no la tenían.

[https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]

[https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/how-the-higgs-field-works-with-math/1-the-basic-idea/]

2. Para el que piense que la frase parece un poco inintelegible, le animo a aplicarla al siguiente caso cotidiano: la velocidad de un objeto no es más que la variación de la distancia recorrida con el tiempo, y la aceleración es la variación de la velocidad con el tiempo -la variación de una variación-. Vemos que sabemos manejar con soltura el concepto de la *variación de la variación*, lo que se conoce en matemáticas como segunda derivada, que es lo que quiere decir la grafía del texto $d^2 \ldots / dt^2$

3. Fijémonos en que es el coeficiente que acompaña al campo en el sumando lineal en Φ.

4. Según la siguiente reacción bidireccional:

Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula.

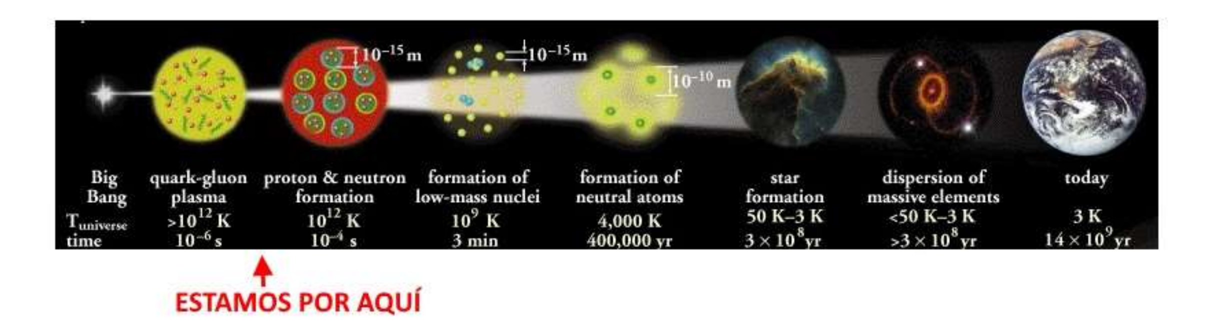
5. Realmente, y de acuerdo a la relación einsteniana $E = mc^2$, la masa está en unidades GeV/c^2

6. Y que ya hemos detectado en otros fenómenos cósmicos, como la fusión de dos agujeros negros en 2015, o la fusión de dos estrellas de neutrones en 2017.

12: Los hadrones

a 1 segundo desde el inicio

Recordamos del capítulo anterior cómo en el tiempo $t=10^{-6}$ segundos después de su inicio el Universo estaba formado por un medio al que llamamos **plasma quark-gluón**, aunque realmente había allí más partículas compañeras de viaje. Este plasma comienza a ser familiar para los físicos, puesto que ya ha sido recreado en experimentos realizados en algún acelerador de partículas como el del CERN.[1] Lo curioso del caso es que estos experimentos nos dicen que, más que a un gas, el plasma quark-gluón se asemeja a un líquido apenas viscoso, a pesar de que la teoría nos dice que la densidad es tremenda, puesto que corresponde a 10^{17} veces la del agua. En este momento de la vida del Universo se ha alcanzado un nivel energético que se encuentra en el entorno de 1 GeV, lo que equivale a una temperatura de crucero de 10^{13}K.



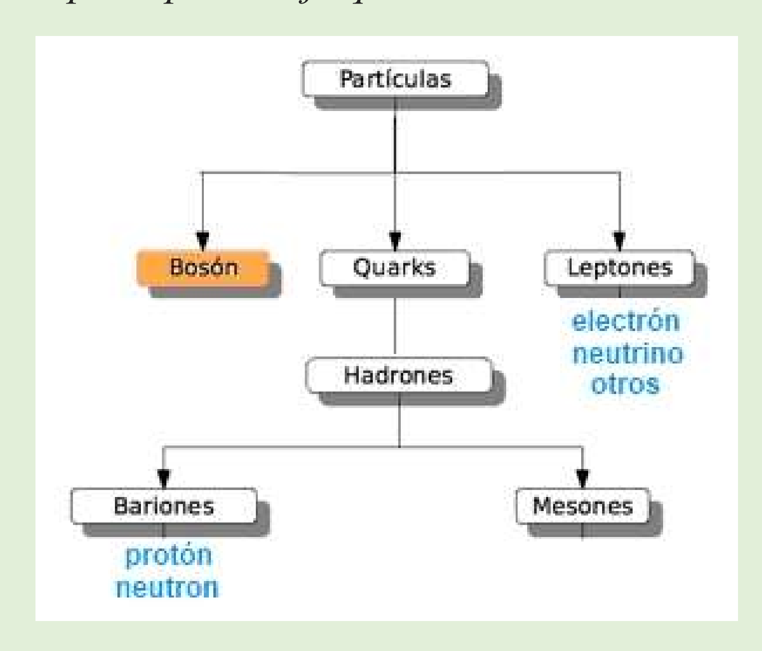
(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Cronómetro 0: tiempo igual a t^{-6} segundos. Va a comenzar la **transición de quarks a hadrones**. La nómina de estos últimos, que son partículas que están formadas por dos o tres quarks, está compuesta por el protón, el neutrón y algún que otro bosón raro, entre los que se encuentra el mesón pión, bosones que tienen su importancia en la fortaleza de los núcleos atómicos. Los quarks son unas partículas elementales que, por lo que sabemos hoy en día, creemos que no están compuestas de otras más pequeñas.[2] Los conocemos de seis "sabores" -se suele usar esta terminología-, seis

quarks distintos emparejados de dos en dos. La masa de tres de ellos supera la energía promedio del momento, lo cual quiere decir que su única oportunidad de aparecer en escena es como producto en alguna reacción "*ad-hoc*" entre partículas o en una fluctuación cuántica de su campo, para luego desaparecer en un plazo brevísimo como corresponde a partículas pesadas. Cosas de la incertidumbre cuántica, ya sabemos. Los otros tres, además de estos caminos para nacer, y al tener una masa inferior a la energía del momento de 1 GeV, aún se generaban en parejas quark-antiquark por el choque de los fotones que en aquella época se movían con ese nivel de energía.

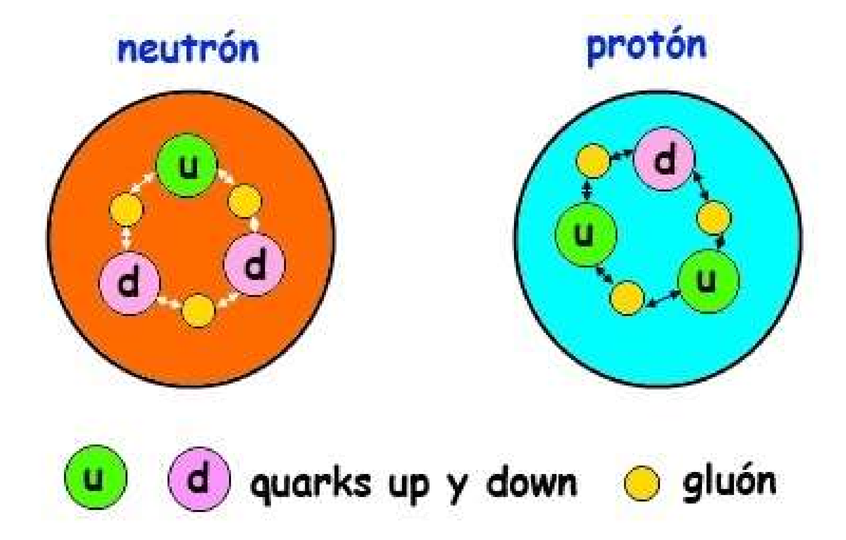
ESTA NOTA ES PARA ENCUADRAR EL MARASMO DE PARTÍCULAS QUE HE SOLTADO EN EL PÁRRAFO ANTERIOR *(y que acompaña al esquema de abajo):*

*Existen dos grandes familias de partículas, los **bosones** mediadores de las interacciones -las fuerzas- entre campos y los **fermiones**, el resto, que formarán la materia. En los fermiones hay otras dos grandes familias, la de las partículas formadas por quarks -los hadrones- y el resto, los leptones. Los mesones son una cosa rara, ya que, a pesar de que caen en la línea de la materia -bajo los quarks-, realmente actúan como bosones intermediadores. Entre los mesones se encuentra el pión, personaje que sale en nuestra serie.*[3]



(Imagen: simplificada a partir de la serie "Esas maravillosas partículas", blog El Tamiz, CC)

En estos momentos la **fuerza nuclear fuerte** se sintió con aptitudes para comenzar a ser protagonista principal, lo que llevó a cabo con la ayuda de su excitación fundamental, el gluón,[4] que comenzó a "pegar" quarks, principalmente los *ups* y *downs*, ya que los otros cuatro, más masivos ellos, por los motivos que hemos comentado ya en otros capítulos,[5] desaparecían en un tiempo menor del que necesita el gluón para hacerlos interactuar, es decir, se esfumaban en su incertidumbre cuántica antes de poder echarles el lazo. La actividad de la fuerza nuclear fuerte fue muy intensa, de forma que creemos que a los 10^{-3} segundos casi no quedaban ya quarks libres: estaban confinados en neutrones y protones. En la figura siguiente se puede ver cómo cada uno de ellos está formado por un trío particular de quarks y tres gluones que les hacen de pegamento. Hay que decir aquí que los protones y neutrones no presentan un aspecto tan plácido como podría deducirse de la figura. Tienen una masa del orden de 1 GeV y, a vista de pájaro, están formados por tres quarks de 4.10^{-3} GeV cada uno y por tres gluones sin masa. Evidentemente, no cuadran los números de la cantidad de masa en juego. El truco está en que en estos pequeños espacios del mundo cuántico, los dominios espaciales internos de un protón o de un neutrón, se generan y desaparecen también millones de partículas virtuales con velocidades relativistas, que aportan la energía necesaria para cuadrar el balance másico de protones y neutrones hasta el experimentable de 1 GeV.



Esquema de las "interioridades" del protón y el neutrón, formados aparentemente cada uno por tres quarks.

El nivel energético medio del momento, 1 GeV, era similar a la masa en reposo de estas partículas compuestas, por lo que la radiación existente apenas los desestabilizaría, pues no tenía suficiente energía como para "romper" sus estructuras. Eso sí, los quarks y antiquarks existentes habían creado hadrones y antihadrones, los cuales rápidamente degenerarían en reacciones de aniquilación de sus quarks y sus antiquarks que dejaron multitud de otras partículas elementales.[6] Al final, lógicamente, dominaría la materia de hadrones sobre la antimateria de hadrones.

A pesar de que ya debían ser muy pocos los quarks libres -prácticamente habían desaparecido a los 10^{-3} segundos gracias a este proceso de confinamiento en hadrones de materia- sí que continuaban existiendo en el plasma una gran multitud de electrones y neutrinos. Podemos contabilizar la población de ambos como uno por cada partícula de radiación. Los electrones, al interactuar con el campo electromagnético, convivían con la radiación en equilibrio térmico: al no haberse llegado aún a su temperatura de condensación -sus masas en reposo son muy pequeñas- hay que pensar que los procesos de creación a partir de la radiación existente, y los de destrucción entre sus pares partícula-antipartícula, se producirían sin trabas, manteniendo las poblaciones estables. Sin embargo, los neutrinos, que no interactúan con la radiación, ni se generarían por choque entre fotones ni estos se producirían cuando se aniquilaban neutrino y antineutrino, que por otra parte se cree que son la misma partícula. Las dos reacciones que siguen serían algunas de las que en aquellos momentos interrelacionarían a las tres partículas elementales, fotón, neutrino y electrón.

Fotón(es) $\leftrightarrow$ $p^+ + e^-$ (positrón$^+$ + electrón$^-$)

En el sentido de izquierda a derecha esta reacción iría decayendo en número a medida que la energía se iba aproximando en su enfriamiento hacia los 0,5 MeV, equivalente energético a las masas de electrón y el positrón, nivel a partir del cual ya era muy difícil crear este tipo de partículas a partir de la radiación. En el sentido derecha a izquierda duraría hasta que materia y antimateria se hubieran anulado mutuamente.[7] Aunque esto último sucedió más o menos a los 10 segundos de vida del Universo.

En las aniquilaciones de electrones no sólo se creaban nuevos fotones, sino también neutrinos, gracias a la fuerza nuclear débil, según el siguiente equilibrio:

$$\mathbf{p^{+} + e^{-} \leftrightarrow neutrino_{e} + antineutrino_{e}}$$

Esta última reacción, que habría contribuido desde la salida de la inflación exponencial a rellenar el Universo con los esquivos neutrinos, era muy efectiva por encima del MeV… ¡y en esta fase el valor de la energía promedio estaba situada por encima de este límite en un factor de diez a mil veces! Aunque tenemos que pensar que estaría perdiendo progresivamente mucha eficacia y de hecho desaparecerá más o menos en la frontera del segundo -1 MeV- tras el inicio del Universo.

Todo parecía indicar que se estaba a medio camino hacia el momento de la culminación de lo que se había pergeñado durante la época de la bariogénesis, con el triunfo final de la materia frente a la antimateria y el nuevo equilibrio de la balanza de partículas, que iba aproximándose al ratio de un barión superviviente por cada 10^9 fotones. Los electrones, como hemos dicho, aún seguían en equilibrio térmico con la radiación y habría que esperar un poco más para que estas partículas quedaran sólo en su forma de materia -como contrario a su antimateria-. Cuando se llegue a ese momento volveremos a contabilizar un electrón por cada protón por aquello de la neutralidad de carga en el Universo. Es decir, un protón y un electrón por cada 10^9 fotones -y neutrinos-. Pero eso será más tarde.

Ahora ya sabemos que en la fase en que nos encontramos el plasma quark-gluón inicial se había transformado sustancialmente. Las cuatro fuerzas fundamentales estaban ya presentes de forma independiente, actuando en un plasma que estaba formado principalmente por protones y neutrones, electrones y una intensa radiación de fotones y neutrinos. Una vez más adopto la licencia de llamar a los neutrinos *radiación*, acepción que se aplica normalmente a los fotones. Pero su poca masa, su velocidad relativista de desplazamiento por el Universo y su participación clave en las dispersiones de partículas en las que interviene la fuerza débil me inducen el imaginar un perfil muy semejante, aunque evidentemente

no igual. Por completar la nómina de la vecindad no nos podemos olvidar de que por algún lado andarían también los neutralinos, o algo así: las fantasmagóricas almas de la materia oscura.

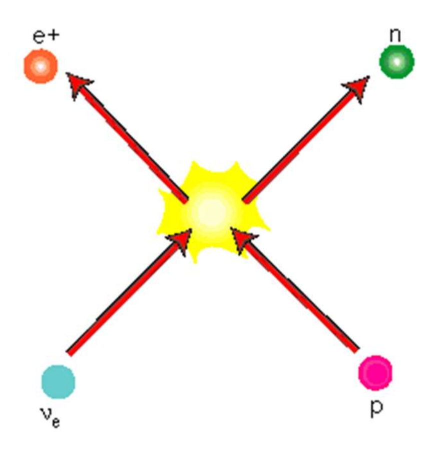
Dediquémoles un poco más de tiempo a los neutrinos, unas partículas muy esquivas. Hasta hace poco se creía que no tenían masa, aunque ahora sabemos que realmente ofrecen a la gravedad una muy ligera interacción, del orden del eV para los neutrinos menos pesados. No tienen carga, por lo que son transparentes para el campo electromagnético. Y también son ignorados por la fuerza nuclear fuerte. Podríamos decir que el campo relativista neutrino sólo está ligado a otros campos de partículas a través del campo de la interacción nuclear débil, con el que participa muy activamente provocando, o siendo el producto, de reacciones de aniquilación de otras partículas. Algunas de ellas son las reacciones de desintegración radiactiva, como las que se dan en el núcleo de las estrellas. En particular, ayudados por los bosones W y Z del campo nuclear débil, no dejaban tranquilos a nuestros bariones.

Ya podemos imaginar que los recién estrenados protones y neutrones estaban quedando a merced de la fuerza nuclear débil. Y los neutrinos, que aunque tenían muy poca masa, en este momento disponían de una energía elevada, estaban también allí, formando una población superabundante. Entre todo este tipo de partículas se producían múltiples interacciones al chocar, provocándose las conocidas como reacciones β inversa (ver imagen de más abajo):

$$\textbf{neutrino}_{e} + \textbf{neutrón} \leftrightarrow \textbf{protón}^{+} + \textbf{electrón}^{-}$$

$$\textbf{protón}^{+} + \textbf{antineutrino} \leftrightarrow \textbf{neutrón} + \textbf{positrón}^{+}$$

Por causa de estas reacciones los protones pasaban a neutrones, los cuales respondían a su vez pasando a protones en un equilibrio numérico casi perfecto. Mientras los neutrinos tuvieran energía suficiente como para provocarlas, su ritmo seguiría tranquilamente. Pero la vida no es tan tranquila. El sustrato que estaba soportando estos intercambios, el tejido espacio-temporal del Universo, se estaba expandiendo, lo cual afectaba a la longitud de onda de los neutrinos, alargándola y en consecuencia disminuyendo su energía.



Esquema de la reacción beta inversa. Un neutrino electrónico y un protón interaccionan decayendo en un positrón y un neutrón (Imagen: Sergio Torres, fair use)

En el difuso momento en que se sobrepasaba el umbral de 1 segundo el nivel energético era tan bajo, 1 MeV, que la energía de movimiento de los neutrinos ya no fue suficiente para iniciar las reacciones nucleares débiles con neutrones y protones. Podemos pensar que las ondas de los neutrinos eran tan grandes que los bariones se escapaban entre las piernas del neutrino. Como resultado, **los neutrinos quedaron libres** para volar a su aire por todo el espacio-tiempo del Universo, abandonando el equilibrio termodinámico que habían mantenido con las otras partículas. Aquellos neutrinos primitivos aún están por ahí, aunque con una energía muy disminuida debido al enfriamiento general producido al expandirse el Cosmos. Los cálculos nos dicen que deberíamos ver en el Universo frío de hoy unos 112 neutrinos por centímetro cúbico. Pensamos que en este mar de fondo, lo que conocemos como **fondo cósmico de neutrinos**, la temperatura ha descendido hasta los 1,95K.[8]

Por desgracia, con el nivel de tecnología del que disponemos hoy en día no podemos llegar a detectar su pista de la misma manera como lo hemos podido hacer con la pista de los fotones que se liberaron de la masa bariónica bastante más tarde. Si consiguiéramos la foto del fondo de neutrinos tendríamos información directa del Universo a la edad de poco más de ¡un segundo!

Pero la historia sigue. Los protones y neutrones que quedaron libres de los neutrinos tras su emancipación cósmica siguieron estando en manos de la fuerza nuclear débil, ahora siguiendo otro tipo de

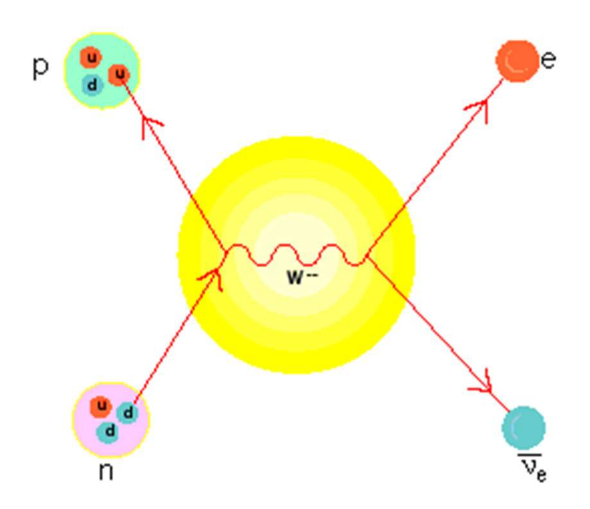
reacciones de desintegración β que les podía afectar, las desintegraciones β^- y β^+:

desintegración β^-

neutrón → protón$^+$ + W^- → protón$^+$ + (electrón$^-$ + antineutrino$_e$)

desintegración β^+

protón$^+$ → neutrón + W^+ → neutrón + positrón$^+$ + neutrino$_e$



Esquema de la reacción beta, característica de la interacción débil, mediada por uno de sus bosones W^-: Un neutrón decae en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico (Imagen: Sergio Torres, fair use)

La primera de las anteriores reacciones β -ver figura anterior- hacía del neutrón una partícula inestable con una vida media de unos 15 minutos: es decir, cada 15 minutos una bolsa de neutrones reducía su población a la mitad… ¡a ese paso nos íbamos a quedar sin neutrones! Sin embargo, la segunda, por la que los protones libres podían pasar a neutrones, se producía cada vez con mayores dificultades por una circunstancia que, a la postre, en aquellos momentos iba a resultar decisiva para el tipo de "personalidad" que iba a adoptar el futuro Universo. El neutrón es ligeramente más pesado que el protón, por lo que en las dos reacciones de desintegración β anteriores era más fácil pasar de neutrón a protón que pasar de protón a neutrón. Lo primero

implica ir energéticamente cuesta abajo -de la masa del neutrón a la menor masa del protón- mientras que lo segundo es una cuesta arriba energética.

La consecuencia es que esta segunda reacción no ocurre con los protones libres, ya que la suma de las energías de las partículas resultantes sería mayor que la del protón inicial. Y esto violaría el principio de conservación de la energía. Este tipo de reacción β^+sólo la observamos en protones ligados, integrados en núcleos atómicos, cosa que en aquel momento aún no existían. Así que poco a poco, mientras bajaba la temperatura, cada vez tenía más fuerza el siguiente NO

protón$^+$ → NO → neutrón + W$^+$ → neutrón + positrón$^+$ + neutrino$_e$

circunstancia por la que el equilibrio protón-neutrón que hasta entonces se había dado se iba haciendo cada vez más difícil. El número de neutrones libres iba decreciendo incrementándose constantemente la relación protón/neutrón. Cuando el cronómetro marcaba 10^{-1} segundos desde el nacimiento del Universo, la relación era de 3 a 2 y en el umbral del segundo, con un 3 a 1, se intuía una futura goleada.

Una vez más el capítulo se está alargando, así que **recapitulemos** dibujando el cuadro general final de la escena del intervalo temporal que estamos analizando. A un segundo tras el Big Bang teníamos unos neutrinos que volaban independientes por el tejido del Universo de aquel momento, unos protones en una posición de fortaleza a costa de unos neutrones en decremento. Y también unos electrones y positrones que, mientras no estaban trabajando para la fuerza nuclear débil, seguían con el mismo juego que hasta entonces: o se estaban aniquilando como parejas partícula-antipartícula o los fotones, que en este momento tenían aún suficiente energía, los iban creando al chocar entre pares. Esto último duró hasta que más tarde se alcanzó la energía de "condensación" de electrones y positrones, que es del orden de los 500 KeV. Hasta el segundo 14 tras el Big Bang los fotones mantendrían aún la suficiente energía como para que hubieran podido regenerar la población, momento tras el que ya sólo

se producirían reacciones de aniquilación entre electrones y positrones, disminuyendo su concentración en el plasma. Dado que la carga eléctrica total en el Universo es cero, al final sólo quedaron el mismo número de electrones que de protones: ya habíamos dicho un poco más arriba que la relación era 10^9 fotones por cada protón.

Abandonamos nuestra ventana temporal celebrando el primer "cumplesegundos" del Universo. Una "esfera" repleta de radiación y neutrinos, algunos bariones y electrones, uno por cada mil millones de fotones, y algunas partículas más, inestables o misteriosas, que se distribuían localmente de acuerdo a las primitivas fluctuaciones cuánticas del periodo inflacionario. Toda esta energía-materia apelotonada formando un plasma de densidad 10^5 veces la del agua a lo largo de una fabulosa extensión del orden de los 10^{13} kilómetros de diámetro, en el entorno dimensional del año-luz y mucho más pequeño que nuestra galaxia, la Vía Láctea. Y todo con una temperatura de 10^{10}K o, lo que es lo mismo, un MeV de energía promedio para todos sus habitantes. Mientras las ondas sonoras y gravitacionales rielaban aquel infierno.

Estamos a las puertas de un suceso trascendental. Uno más, claro. Lo presentaré en el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 12:

1. En este enlace podéis profundizar en el tema:

   [http://francis.naukas.com/2013/11/18/francis-en-trendingciencia/#more-28270]

2. Claro que hasta hace unas décadas pensábamos que el protón y el neutrón eran a su vez elementales…
3. De nuevo… a qué estáis esperando para leer la serie del blog "*El Tamiz*", "*Esas maravillosas partículas*":

   [http://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]

4. Aquí tenéis su historia, en el blog "*El Tamiz*":

[http://eltamiz.com/2007/10/18/esas-maravillosas-particulas-el-gluon/]

5. Simplemente lo obliga la realidad física descrita por el principio de incertidumbre: si se concreta mucha energía -masa- a partir del vacío necesariamente lo hará en un tiempo muy pequeño.

6. En estos dos enlaces podéis ver algún ejemplo gráfico del tema:

[http://particleadventure.org/spanish/top_pros.html]

[http://particleadventure.org/spanish/k2s.html]

7. Dejando electrones y una cantidad marginal de positrones. Esta partícula, que fue predicha en la teoría por Paul Dirac, fue encontrada al fotografiar las huellas de los rayos cósmicos en una cámara de niebla. En la actualidad los positrones, a pesar de ser antimateria, nos son muy familiares y los producimos con facilidad, por ejemplo, cuando hacemos una tomografía por emisión de positrones.

8. Aunque si se tienen en cuenta sus pequeñas masas los cálculos nos dicen que estarán mucho más fríos, a $1{,}6\times10^{-4}$K.

13: La nucleosíntesis I

desde 1 segundo a 380.000 años desde el inicio

Pero… ¿cómo es esto? Desde 1 segundo a 380.000 años… ¡PERO ESTO ES UNA BARBARIDAD! Hasta ahora hablábamos de fracciones temporales casi infinitesimales. ¿Qué pasó para alargar tanto el calendario?

Pues pasó que el mundo cambió entre los 30 y los 240 segundos. Un auténtico "*hat trick*" de la magia física que más tarde desvelaremos. Antes de los cien segundos lo que sucedió fue continuación de lo mismo que había estado pasando al final del capítulo anterior, consecuencia de la aparición de los protones y neutrones libres. Después de los 240 segundos de vida, lo único digno de mención es que el Universo siguió expandiéndose y enfriándose. Y así hasta que 380.000 años más tarde alcanzó una temperatura de unos 3.000K, semejante a la que hay en la superficie del Sol. En unos escasos 200 segundos el Universo inventó la novedad del núcleo atómico.



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Pero vayamos por pasos. Recordemos cómo en el capítulo anterior nuestro plasma estaba formado básicamente por radiación de fotones y neutrinos, electrones y positrones peleando y aniquilándose entre ellos, unos protones no demasiado abundantes y unos neutrones cada

vez menos numerosos. Y entre ellos, comandando sus vidas, las cuatro fuerzas fundamentales generando sus particulares bosones intermediadores.

Hasta el segundo 14 siguió la batalla perdida del neutrón por sobrevivir. Más o menos en este tiempo la energía media del universo bajó hasta un nivel de 0,5 MeV, con la que los electrones no podían ya transformar protones en neutrones en interacciones β,[1] mientras que su inestabilidad natural, la del neutrón, hubiera hecho que se redujera su población universal a la mitad cada 15 minutos.[2] Por el contrario, los protones conseguían mantener su población e incluso incrementarla gracias al decaimiento de los neutrones. De forma que en este momento en particular la menguante relación protón/neutrón ya era de 5/1. Protones y neutrones que se trataban casi de tú a tú, molestos solamente por la acción de los fotones que continuamente chocaban con ellos, desviando su trayectoria y dificultando cualquier tipo de nuevas relaciones entre ellos. Mientras, los electrones seguían apurando los últimos coletazos en sus relaciones de equilibrio térmico con los positrones y con la radiación.

A partir de un difuso segundo 14, con un Universo a 3×10^9K, los electrones y los positrones empezaron a ser aniquilados más rápidamente de lo que eran regenerados a partir de los fotones y de los neutrinos. No en vano la energía media había caído por debajo del MeV, equivalente a la masa del electrón y el positrón. Este tipo de reacciones de aniquilación

$$\mathbf{p^+ + e^- \quad \rightarrow \quad fotón \ + \ fotón}$$

eran más frecuentes que éstas otras inversas de creación

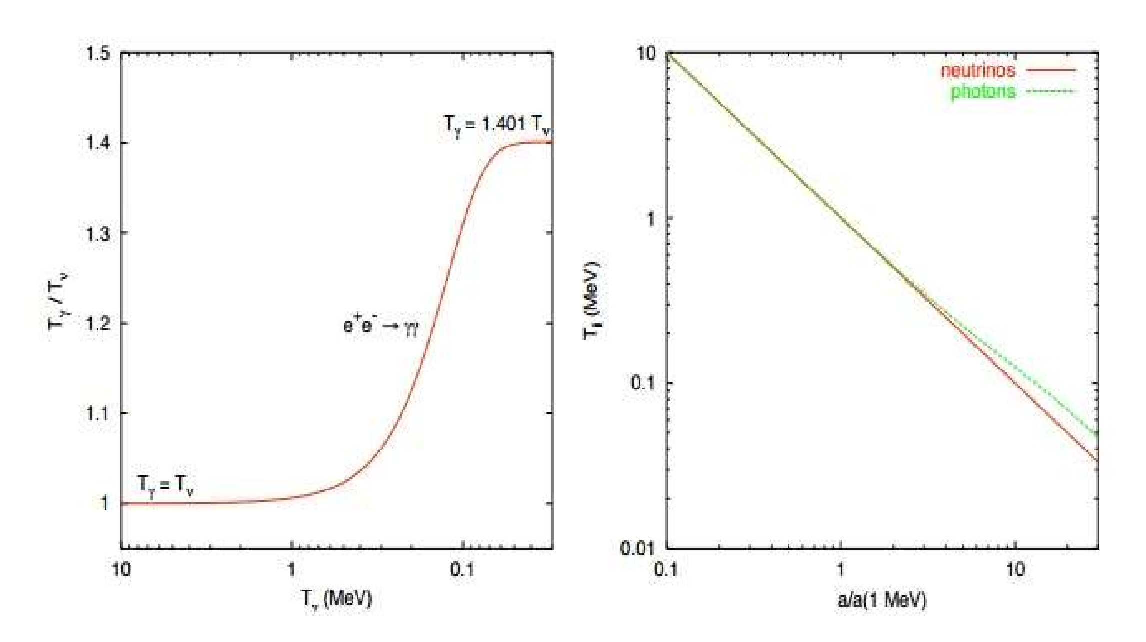
$$\mathbf{Fotón(es) \quad \rightarrow \quad p^+ + \ e^-}$$

Este hecho hacía que se incrementara con nuevos fotones, producto de las reacciones de aniquilación, la población de la radiación, sin que se consumieran en las reacciones contrarias, lo que supuso una inyección de energía en la misma[3] que provocó una ligera ralentización en la situación de caída libre de la velocidad de enfriamiento. Sin embargo, los neutrinos que se habían desacoplado del plasma hacia poco, como vimos en el capítulo anterior, no

sufrieron este recalentamiento, ya que sus densidades en el Universo habían sido fijadas desde el momento de su emancipación de la materia. La consecuencia es que hoy si llegáramos a observar a aquellos neutrinos de fondo, cosa que aún no hemos conseguido, casi con seguridad los encontraríamos más fríos que la radiación de fondo de fotones. ¿Cuánto? Lo que nos diga esta relación que sigue, en la que ν se refiere a los neutrinos y γ a los fotones de la radiación

$$\frac{T_\nu}{T_\gamma} = \left(\frac{4}{11}\right)^{(1/3)}$$

Como hoy la temperatura de la radiación cósmica de fondo de fotones es de 2.7K, la del fondo de neutrinos tendrá que ser de 1.95K. A la vista de este "frío" tan próximo al cero absoluto y lo esquivos que son los neutrinos, quizás su detección se escape a nuestras posibilidades. Desde luego, hoy por hoy constituye una ardua tarea.



Evolución del hueco de temperaturas entre los neutrinos de fondo y los fotones (Imagen: Julien Lesgourgues y Sergio Pastor, fair use)

Las curvas anteriores dibujan perfectamente esa situación de desemparejamiento de neutrinos y fotones primigenios. A la izquierda se indica cómo va variando la relación de sus temperaturas a lo largo de la fase en que seguía el proceso de aniquilación de electrones y positrones cuando los neutrinos ya se habían liberado. A

la derecha se ve cómo las temperaturas de neutrinos y fotones se van separando con la expansión del Universo,[4] a favor de un recalentamiento de los segundos.

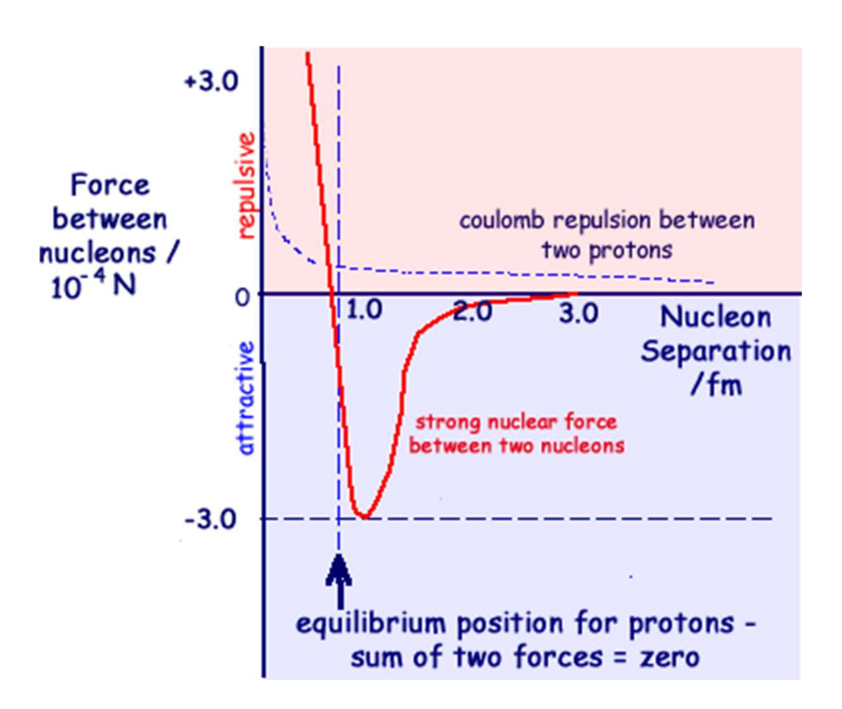
Pero esta situación no duró mucho, ya que, a pesar del ligero frenado del proceso de enfriamiento por la expansión del Universo, se llegó a lo inevitable. Al poco de la fuga neutrínica se llegó a un nivel energético promedio por partícula tal que protones y neutrones, a pesar de las interferencias y choques con los fotones, pudieron por fin aproximarse lo suficiente entre ellos como para que la fuerza nuclear fuerte pudiera intervenir. A pesar de que tal fuerza llevaba un tiempo echando toda la carne en el asador para contener a los quarks juntos dentro de protones y neutrones gracias a la inestimable colaboración del campo gluónico, le sobraba energía para seguir con sus diabluras, ahora apoyada por el campo piónico. La **fuerza nuclear fuerte residual**, con la ayuda del bosón pión, aglutinó a protones y neutrones formando núcleos atómicos.

Dicho lo dicho, nos podemos preguntar por qué sucede esto si las cargas positivas de los protones deberían repelerse y romper el núcleo, o bien el porqué de que unas partículas neutras como los neutrones tengan esta afinidad a los protones, con los que forman estructuras tan estables. La respuesta la encontramos en el diferente patrón de fortaleza que tienen las fuerzas electromagnética y nuclear fuerte con relación a la dinámica de unión-separación entre dos partículas en juego.

El potencial de la última interacción, la fuerte, sigue el siguiente patrón

$$\mathbf{U_{nf} = K\ [e^{-mr} / r]}$$

Siendo K una constante, m la masa del pión -la partícula intermediadora- y r la distancia entre las dos partículas que interaccionan en el campo nuclear fuerte.[5] Este potencial dibuja una curva en la que aparece un pozo, como lo podemos ver en la imagen siguiente, en donde la hemos comparado con la hipérbola decreciente de la interacción electromagnética.



En este diagrama el eje vertical corresponde a la fuerza de atracción entre nucleones, en newtons (kg x m/seg ^{2}), mientras que en el eje horizontal se representa la distancia r entre ellos, en fermis (10^{-15} metros) (Imagen: fair use)

El hecho físico en la aproximación de dos protones sería el siguiente (ver esquema de arriba): La fuerza electromagnética se hace mayor en las cortas distancias, así que la repulsión entre dos protones se hace más acusada a medida que se acercan el uno al otro. Sin embargo, la fuerza nuclear fuerte presenta otro patrón. Para distancias más grandes de 10^{-15} metros, el tamaño aproximadamente del radio de un protón, genera un pozo de potencial lugar ideal para que los nucleones reposen en un mínimo unidos por una tremenda fuerza atractiva producida por la intermediación de bosones pión entre protones y neutrones, de acuerdo a las reacciones que indico un poco más abajo. En estas distancias se manifiesta como una fuerza atractiva mucho más potente que la electromagnética repulsiva. Más allá de los 10^{-15} metros su fuerza decae exponencialmente, haciéndose despreciable frente a la fuerza electromagnética.

Y esto es lo que sucede en el núcleo de cualquier átomo mayor que el del hidrógeno,

$$\mathbf{p^{+}_{a} + n^{0}_{a} \rightarrow (n^{0}_{b} + \pi^{+}) + n^{0}_{a} \rightarrow n^{0}_{b} + (\pi^{+} + n^{0}_{a}) \rightarrow n^{0}_{b} + p^{+}_{b}}$$

$$\mathbf{n^0_a + p^+_a \rightarrow (p^+_b + \pi^-) + p^+_a \rightarrow p^+_b + (\pi^- + p^+_a) \rightarrow p^+_b + n^0_b}$$

Como se ve, dentro del núcleo hay un continuo baile de protones (p^+) y neutrones (n^0) de primera generación (subíndice a) que pasan, apoyados por los piones (π), a neutrones y protones de segunda generación (subíndice b). Así que el pión es el que proporciona el pegamento de cohesión, quedando claro que para conseguir núcleos los protones precisan de la presencia de neutrones. Cuanto más parecido sea el número de unos y otros, los núcleos serán más estables. Si dominasen los protones, la repulsión electromagnética rompería al núcleo; si dominasen los neutrones, algunos quedarían fuera del alcance de la fuerza nuclear fuerte que les une a los protones, por lo que se desintegrarían al estar libres.[6]

La **nucleosíntesis**, o consolidación de los primeros núcleos atómicos, se inició mucho antes de que pudieran haber pasado los primeros 15 minutos, duración de la vida media de un neutrón –exactamente 885,7 ± 0,8 segundos-. A los 100 segundos aún podíamos encontrar neutrones libres -los que se estaban escapando de la quema- dispuestos a enlazar sus vidas con los protones, por lo que más o menos en este momento comenzaron a aparecer los primeros núcleos atómicos de una forma estable.[7] Para un protón le resultaba más fácil -más probable dado el nivel de energía- echar mano de la fuerza nuclear fuerte que del electromagnetismo. Por eso dejó pasar su primera oportunidad de formar un átomo de hidrógeno y se fue con un neutrón a formar un núcleo de deuterio. Y esto fue lo que salvó a los neutrones de la aniquilación total: El quedar protegidos dentro de un núcleo atómico.

Recordemos cuál era la amenaza para los neutrones libres:

$$\textbf{neutrón} \rightarrow \textbf{protón}^+ + \textbf{electrón}^- + \textbf{antineutrino}_e$$

Con el neutrón dentro de un núcleo, y allí asociado con los protones, si se hubiera dado esta reacción de desintegración, el electrón no hubiera podido escaparse del núcleo, ya que no nace con la energía suficiente como para vencer la atracción de la carga positiva de los protones. Hubieran entonces colapsado protón y electrón, por lo que

realmente se plantea como imposible el que se iniciara cualquier desintegración β en neutrones nucleares no libres.

El núcleo más simple ya lo teníamos allá por el segundo $t=10^{-6}$, desde que aparecieron los hadrones a partir de los quarks: el del hidrógeno, es decir, un solitario protón. Pero para salvar a los neutrones nos interesa por tanto algo más sofisticado como núcleo, el del deuterio: un protón y un neutrón unidos en todo su esplendor mediante la intermediación de los piones.

El resultado de tal cuestión nos parece que debió ser trascendental. Hoy en día vemos cómo nuestro mundo está conformado por el juego físico entre elementos químicos. Se nos antoja, pues, que al nacimiento del núcleo del deuterio le debemos prestar una atención especial. Y eso es lo que haremos en el siguiente capítulo, donde no sólo hará acto de presencia el deuterio, sino que también aparecerán unos pocos colegas más.

NOTAS DEL CAPÍTULO 13:

1. Era una de las fuentes más importantes para la repoblación de neutrones. Recuerdo la ecuación que gobernaba esta transacción, que ya fue comentada en el capítulo 12 dedicada a los hadrones: $\text{neutrino}_e + \text{neutrón} \leftrightarrow \text{protón}^+ + \text{electrón}^-$
2. Mientras el neutrón no está confinado en un núcleo atómico ligado a los protones por la fuerza nuclear fuerte interpuesta por su bosón (pión), está sometido a un proceso natural de desintegración β^- según esta reacción [$\text{neutrón} \rightarrow \text{protón}^+ + W^- \rightarrow \text{protón}^+ + (\text{electrón}^- + \text{antineutrino}_e)$], que le condena a un tiempo medio de vida de 885,7 ± 0,8 s.
3. Al haber más fotones en el mismo volumen su velocidad aumenta, y por tanto también lo hace la temperatura que sigue -con un exponente a la cuarta- a la densidad de la radiación.
4. Esta expansión está indicada en la curva en unidades del factor de expansión del Universo “a” normalizado al valor de “a” en el momento de la emancipación de los neutrinos, 1 MeV.

5. Para los curiosos, esta forma para el potencial de la fuerza nuclear fuerte la propuso el físico japonés Hideki Yukawa, premio Nobel de física en el año 1949.

6. En realidad eso es lo que se observa en la naturaleza, en donde los átomos, y sus isótopos, si los ordenamos en unos ejes que representan el número de neutrones y el número de protones, toman la forma de una nube alargada más o menos según la diagonal de los ejes. Realmente, a altos números atómicos -muchos protones- el núcleo proporcionalmente necesita un extra de neutrones para compensar la gran fuerza de repulsión electromagnética que se acumula con tantos protones. En líneas generales, los átomos que se ajustan al "eje" central del ordenamiento son estables. Los situados por encima o por debajo tienen exceso de protones o de neutrones, y por tanto tienden a ser inestables, cosa que solucionan con algún tipo de decaimiento β por el que un neutrón pasa a protón o bien un protón pasa a neutrón. Si se ve la estabilidad del núcleo muy "apurada" puede emitir directamente un protón o un neutrón sin más líos, siendo el que sigue el proceso cuando los núcleos son muy muy grandes: directamente se desprenden de una parte -el mínimo es una partícula α, que están formadas por dos neutrones y dos protones- o bien se fisionan espontáneamente.

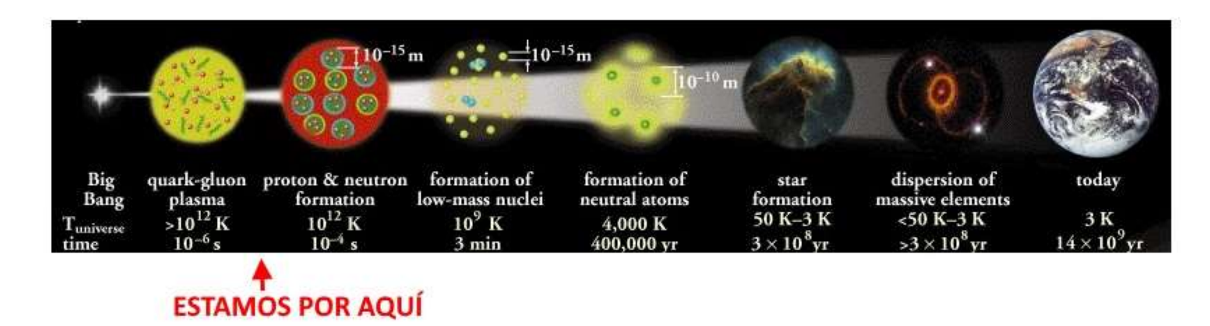
7. Ya habían aparecido núcleos de deuterio, un protón más un neutrón, desde los 30 segundos, pero de forma inestable.

14: La nucleosíntesis II

desde 1 segundo a 380.000 años desde el inicio

En el transcurrir de esta historia sobre nuestro Universo habíamos llegado en el capítulo anterior a abrir la ventana por donde se entreveían los núcleos de unos futuros actores imprescindibles en la representación, como son los elementos químicos. Para enlazar con lo que allí dijimos, transcribo uno de sus últimos párrafos:

"*El núcleo más simple ya lo teníamos allá por el segundo t=10*$^{-6}$*, desde que aparecieron los hadrones a partir de los quarks: el del hidrógeno, un solitario protón. Pero para salvar a los neutrones nos interesa por tanto algo más sofisticado como núcleo, el del deuterio: un protón y un neutrón unidos en todo su esplendor mediante la intermediación de los piones*."



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

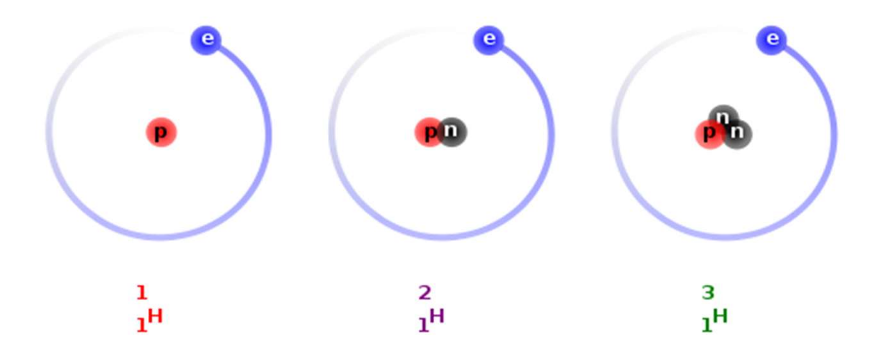
Todo pasó en un pequeño momento dentro de una larga era: desde el segundo 30 al segundo 240, dentro de lo que se nos imagina un inmerso periodo que decidimos acotar entre un segundo y 380.000 años desde el inicio del big bang. Después de los 240 segundos parece que el Universo, acabado de tomar el postre de la nucleosíntesis, se sentó a digerir todo lo que le había pasado mientras seguía expandiendo su dilatado estómago.

Pero sigamos la historia. Si analizamos la energía de enlace de los primeros elementos de la tabla periódica de Mendeléyev o sus isótopos, teóricamente podríamos esperar que cada uno de ellos aparecería, o se haría definitivamente estable, cuando el nivel energético promedio del Universo cayera por debajo de la energía con que se enlazan sus nucleones. Así que, para poder seguir las posibilidades de creación de los siguientes núcleos tras el del hidrógeno, vamos a ver qué características tiene el posible "material" implicado, recordando que en el tiempo un segundo después del Big Bang la energía promedia era de 1 MeV y a los 200 segundos, de 100 KeV. A continuación listo las energías de enlace por nucleón en los primeros elementos más ligeros:[1]

- Deuterio (1p + 1n) 1,11 MeV
- Hidrógeno 3 (1p + 2n) 2,83 MeV
- Helio 3 (2p + 1n) 2,57 MeV
- Helio 4 (2p + 2n) 7,07 MeV
- Litio 6 (3p +3n) 5,33 MeV
- Berilio 8 (4p + 4n) 7,06 MeV

Como vemos, en t=1 segundo la energía del universo había ya caído por debajo de las energías de enlace de todos ellos, por lo que si los nucleones pueden acercarse lo suficiente para quedar amarrados por la fuerza nuclear fuerte se conseguirán formar los correspondientes núcleos. Pero eso depende a su vez de este mismo nivel de energía y de la velocidad de expansión del universo que lo atempera, haciendo que las partículas vayan cada vez más lentas. Si lo hace demasiado deprisa, éstas no tendrán energía cinética suficiente como para aproximarse la distancia adecuada entre ellas para generar una ligadura. Por el contrario, si lo hace demasiado despacio la energía cinética de los nucleones será muy alta, produciéndose el choque y subsiguiente rebote antes de ser atados.

Pero el Universo se expandió de forma adecuada como para que esto último no fuera lo que ocurrió. De lo cual hay que dar muchas gracias, porque si no hubiera sido así el mundo sería de otra manera, de forma que no estaríamos ahora frente a la pantalla de un ordenador… ni en el mundo de las ideas.



Esquema de los tres isótopos naturales del hidrógeno, de izquierda a derecha: protio, deuterio y tritio (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Podemos pensar que al ser la energía de enlace de los nucleones del helio 4 muy alta, antes habría pasado la frontera del equilibrio térmico hacia el estado libre **y estable**, por lo que las primeras reacciones de nucleosíntesis fueron quizás las suyas. Sin embargo, a tan altas energías los cuatro bariones que se tenían que unir se desplazaban aún a velocidades demasiado altas como para que la fuerza nuclear fuerte los atara a los cuatro **a la vez**: la probabilidad de obtener un núcleo de helio 4 era baja. Esta circunstancia obligaba a que este núcleo naciera por aproximaciones sucesivas a partir de una primera unión de dos nucleones… para seguir con la adición paulatina de los otros. Y lo mismo le estaba pasando al hidrógeno 3 o al helio 3. Eso quiere decir que realmente las **primeras reacciones de nucleosíntesis** tuvieron que ser las que **produjeran núcleos de deuterio**.

Podemos pensar que si se hubieran juntado dos protones, o dos neutrones, y se hubiera convocado a la fuerza nuclear débil, se podría haber conseguido en cada caso un núcleo de deuterio mediante el cambio de sabores en uno de los miembros de la pareja -un protón a neutrón o un neutrón a protón-, por el mero hecho de seguir cualquiera de las dos reacciones siguientes:

protón + protón → protón + [neutrón + positrón + neutrino] → deuterio + positrón + neutrino

neutrón + neutrón → neutrón + [protón + electrón + antineutrino] → deuterio + electrón + antineutrino

Sin embargo, en aquel momento la fuerza nuclear fuerte era más potente que la débil en un factor de varios órdenes de magnitud, por lo que era más fácil, más probable, el que se diera la reacción directa entre protones y neutrones, sin intermediación de neutrinos:

neutrón + protón → deuterio + 2,22 MeV

Pero cualquier partícula que portase una energía superior a estos 2,22 MeV rompería el frágil núcleo del deuterio, lo cual suponía una seria barrera en el camino hacia núcleos más pesados. La estabilidad definitiva del deuterio se conseguiría a partir de un momento en que la temperatura fuera la equivalente a este nivel de energía. Para ello tuvo que bajar hasta 10^{10}K, cuando la energía del Universo se colocó en un nivel del orden del MeV en la frontera de los 14 segundos de la que hemos hablado antes.

A los 100 segundos tras el Big Bang la energía era de 100 KeV y seguramente muchos núcleos de deuterio eran ya estables. En aquel momento la mitad de los neutrones existentes vivían enlazados en núcleos de deuterio. Todo dibujaba un escenario propicio para que los núcleos de deuterio existentes pudieran reunirse de forma estable y en cantidades significativas, aumentar el tamaño y gestar así nuevos núcleos. Como podemos ver en el diagrama siguiente, los más sencillos surgirían por la unión de un deuterio con otro protón, u otro neutrón, dando en cada caso un núcleo de helio 3 o un núcleo de tritio, siguiendo las pautas de las siguientes reacciones:

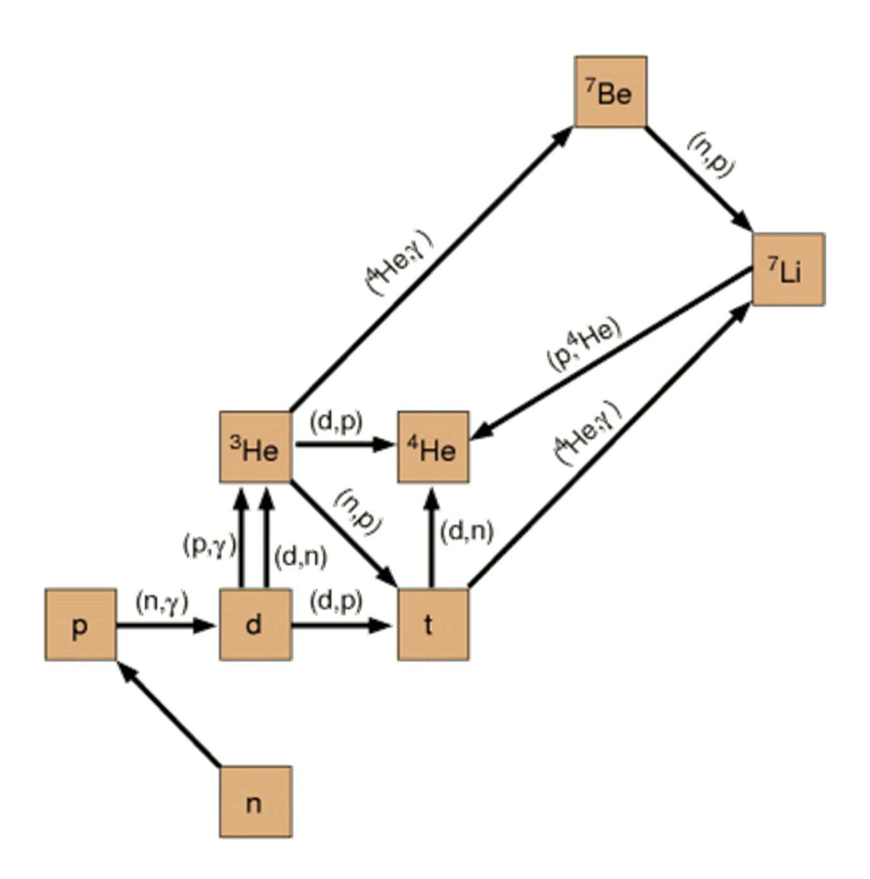
deuterio + protón → ^{3}helio + fotón

deuterio + deuterio → ^{3}helio + neutrón

deuterio + deuterio → tritio (^{3}hidrógeno) + protón

Para conseguir el núcleo del helio 4, que tiene dos protones (p) y dos neutrones (n), se hacía preciso pasar por los dos isótopos anteriores, tritio (t) o helio 3, según podemos ver en el esquema anterior. El helio 4, a los niveles de energía en que el deuterio (d) ya estaba consolidado –hemos decidido hacer la foto a 100 KeV-, era muy estable, como podemos deducir de la ecuación ficticia que fija su nacimiento

protón + protón + neutrón + neutrón → helio 4 + 28 MeV



Esquema de las reacciones que debieron ocurrir durante la nucleosíntesis inicial (Imagen: Achim Weiss, Max Planck Institute for Gravitational Physics, fair use)

Es decir, que para volver a romper el helio 4 se necesitaban fotones de 28 MeV, cosa que en aquel momento en que la energía rondaba las escasas décimas de MeV era un imposible. El helio era, por tanto, muy estable y, en teoría, se podía seguir el camino de construcción de núcleos mayores. Como sería el siguiente, el boro 5, el cual era muy inestable, circunstancia que hizo que su participación en la población de núcleos atómicos se hiciera mínima. Los siguientes fueron el litio 6 y el berilio 7, cada uno de ellos en menor proporción, ya que el imparable enfriamiento hacía que cada vez hubiera menos energía, lo que ya sabemos que dificultaba las uniones por interacción nuclear fuerte. El núcleo de 8 nucleones, el del berilio 8, era también inestable… y se acabó. Hasta ahí dio la energía primigenia para crear nuevos actores, ya no podía aproximar lo suficiente a dos núcleos con cargas positivas de forma que los piones de la fuerza nuclear fuerte,

que allí estaba, pudieran actuar. **Habían pasado 3 minutos desde el inicio**. Se había culminado prácticamente el proceso de la nucleosínteis con un resultado final -transitorio-[2] en donde había múltiples protones, bastante helio y ligeras trazas de otros núcleos más pesados. Definitivamente, a los 13 minutos todo había pasado.

A los 200 segundos podemos considerar que todos los neutrones supervivientes se habían blindado dentro de los núcleos,[3] dejando la menguante relación con los protones en un valor próximo a 7/1, es decir 7 protones por cada neutrón. Eso ¿qué significaba? Si la mayor parte de los núcleos existentes eran los de hidrógeno, un único protón, y los de helio -dos protones y dos neutrones- y la relación protón/neutrón era 1/7, podemos hacer la siguiente estimación:

Núcleo de helio = 2 neutrones + 2 protones

1 neutrón = 7 protones,

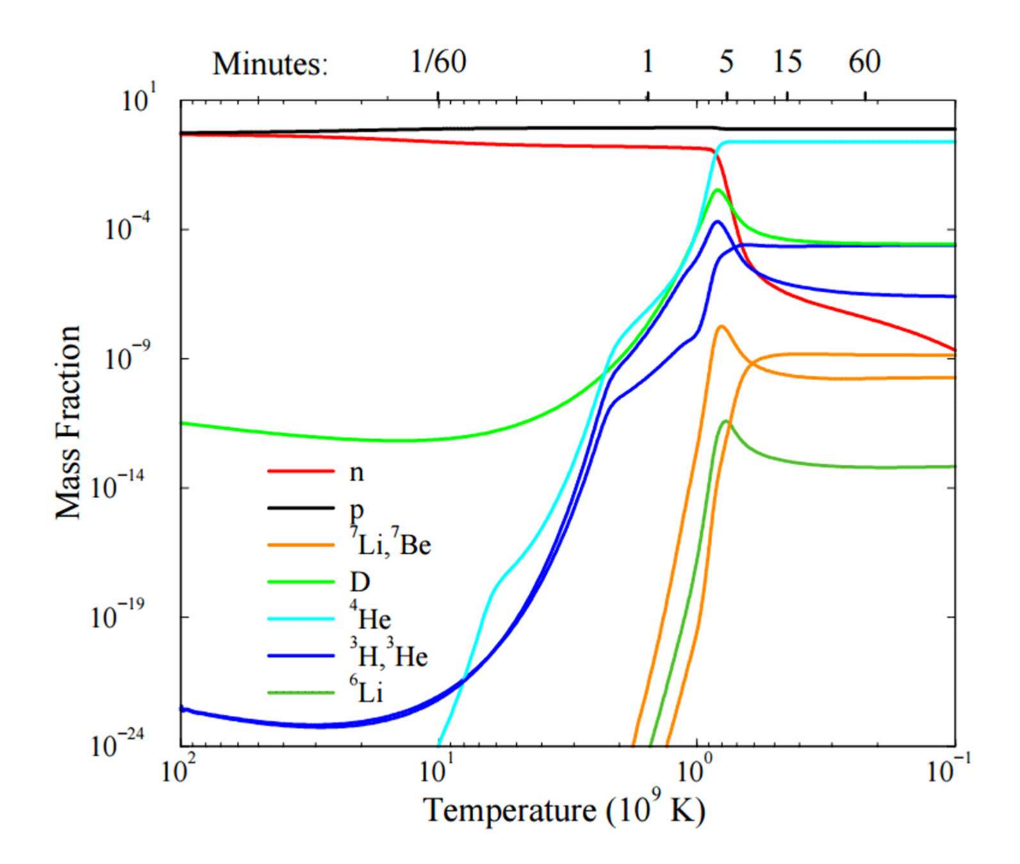
luego la existencia de 1 núcleo de helio requería la existencia de 14 protones, 7 por cada uno de sus 2 neutrones. Pero como en el núcleo de helio hay dos protones, habría que restarlos de los 14 que dijimos, hasta unos 12 protones -doce núcleos de hidrógeno-. Lo cual quiere decir que los bariones, y por tanto sus masas, se habían repartido un 25% en el helio y un 75% en el hidrógeno. Es decir, la proporción entre ambos elementos quedó en 1 núcleo de helio por cada 12 hidrógenos.

Sorprendentemente, o quizás no tanto, **éstas son las proporciones que observamos hoy en día en el Universo**. Lo cual afianza bastante bien nuestro confort con las teorías del Big Bang y la teoría estándar de partículas.

¡Atención! Con tanto pensar en modo “núcleo atómico” no nos olvidemos de los electrones y positrones, que con energías de “condensación” de 0,5 MeV hacía tiempo que habían dejado el equilibrio térmico y estarían dando los últimos coletazos de aniquilación partícula/antipartícula, soltando fotones no muy energéticos, pero en suficiente número como para recalentar la radiación del Universo y aumentar ligeramente su ritmo de expansión. Al final quedarían tantos electrones como protones,[4] uno

por cada 10^9 fotones, y muchos neutrinos. De tal forma que a día de hoy contabilizamos por metro cúbico

4,11 x 10^8 fotones + 0,22 protón/electrón/neutrones + 1,12 x 10^8 neutrinos



Este gráfico muestra la evolución temporal de las abundancias de los elementos ligeros (Imagen: Burles, Nollett & Turner (1999), fair use)

Podemos hacer también un cálculo teórico para los masivos (y misteriosos) neutralinos del orden de los 200 GeV, una de las partículas candidatas de la materia oscura. Ya que la relación másica con los bariones parece que es de 5 a 1, como veremos en otro capítulo, el número de **neutralinos** en el universo sería de **1 por cada 40 protones**, es decir, más o menos 0,0055 por cada metro cúbico.

Tras toda la interesante historia de la nucleosíntesis, entramos ahora en un largo periodo de relativa estabilidad, a lo largo del cual el plasma se expandirá hasta tener unas densidades inferiores a la del agua, dejando a sus partículas muy dispersas unas de otras. Ondas sonoras y gravitatorias llevaban su información de un lado para otro.

En este mundo, los protones arrastraban en sus cercanías a los electrones gracias a una especie de cortejo de cargas. Mientras que todos los fotones, a pesar de ser muy numerosos, andarían atareados chocando con los electrones en procesos que se conocen como *dispersiones Thomson*.[5] Por esa causa los fotones no podían volar en libertad, lo que hacía de aquel plasma una especie de opaca niebla bajo la potente e invisible mano, como telón de fondo, de la esquiva materia oscura.

El siguiente cambio fundamental será la formación de átomos mediante la unión de los núcleos y los electrones existentes. Pero aún se tuvo que esperar mucho, hasta que la temperatura del Universo fuera lo suficientemente baja, unos 3.000K -semejante a la de la superficie de nuestro Sol-, como para que el campo de la fuerza electromagnética, con sus fotones, pudiera por fin intervenir en un mundo repleto de partículas y núcleos con carga eléctrica.

Esto sucedió en el entorno de cuando se cumplía el año 380.000 tras el nacimiento del Universo, siendo éste en ese momento unas 1.100 veces más pequeño que el que conocemos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 14:

1. En el siguiente tenéis los datos de todos los elementos e isótopos, con los que podéis jugar viendo como varían sus características al movernos en vertical -mismo número de neutrones- u horizontal -mismo número de protones-.

[https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html]

2. Lo de *transitorio* lo digo porque es evidente que en el Cosmos hay muchos más tipos de elementos con sus núcleos. Pero para que siguiera la cadena con los siguientes habrá que esperar algunos cientos de millones de años. No os pongáis nerviosos, porque ya llegará el capítulo donde siga la saga. Mientras, para los impacientes, podéis leer estas dos entradas del blog "*El Tamiz*":

[http://eltamiz.com/2007/11/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-las-gigantes-rojas/]

[http://eltamiz.com/2007/12/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-supernovas-de-tipo-ii/]

3. Dada la estabilidad del núcleo del helio 4, prácticamente casi todos los neutrones estaban confinados en este tipo de núcleos.
4. La carga eléctrica total del Universo debe ser cero. Imaginad lo que pasaría si no fuera así: la fuerza electromagnética es muchos órdenes de magnitud superior a la de la gravedad, pues la relación de intensidades entre ambas fuerzas para dos protones en el núcleo es del orden de 10^{-36}. Si hubiera un balance de carga positivo, la gravedad no sería capaz de contrarrestar la fuerza de repulsión de cualquier pequeña carga residual que quedase en el Universo.
5. La dispersión de Thomson es la dispersión elástica que sufre la radiación electromagnética en el choque con una partícula cargada libre. La energía cinética de las partículas y la frecuencia de los fotones no cambian como resultado de la dispersión, lo cual sucede siempre y cuando la energía del fotón sea mucho menor que la energía de la masa de la partícula, o equivalentemente.

15: La sinfonía del Universo I

a lo largo de los primeros 380.000 años

A estas alturas de nuestra biografía, y ya lo veníamos advirtiendo en capítulos anteriores, sabemos que el Universo había emprendido un largo camino de monotonía que iba a durar casi cuatrocientos mil años. La radiación seguía dominando su dinámica, haciendo que continuara expandiéndose a un ritmo proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, por lo que progresivamente disminuía la densidad del plasma que rellenaba el Universo. Pasó por un momento en que tuvo la del agua, luego atravesó el nivel de la del aire y no paró, pues se encaminaba hacia un estado en el que cada centímetro cúbico iba a tener tan sólo unos 10^3 átomos.[1]

En estas condiciones, el plasma de núcleos ligeros, electrones, fotones, neutrinos y algunas partículas de otros sabores que formaba la esencia del Universo, era como un gas. Podemos imaginar a la materia de ese gas como un mar profundo que se movía meciéndose convulsivamente dibujando un patrón de ondas causadas por la gran alteración inflacionaria primigenia. Y al igual que el sonido es un vaivén en las moléculas del gas de la atmósfera, el plasma del Universo estaba también repleto de resonancias sonoras.

Podemos compararlo a una sala de conciertos, quizás escuchando la Octava Sinfonía de Beethoven, la Pequeña Sinfonía, con un ambiente que está repleto de sones, muchos de ellos ondas en el rango de frecuencias audibles para el hombre. Unas provendrán de los violines o las trompetas, y serán más agudas, mientras que otras las habrán emitido los contrabajos o los trombones y serán más graves. Montadas en las ondas fundamentales de cada instrumento se encuentran además cientos de armónicos, que dan colorido y cuerpo a la música de la sinfonía. Curiosamente, de la misma manera a como los armónicos de las ondas de presión en el plasma del Universo apuntalaban el futuro dibujo de la materia.

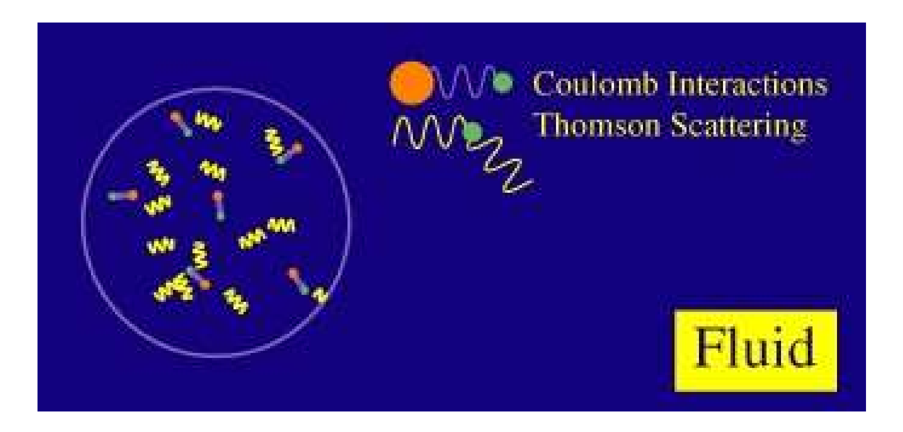
La pregunta es: ¿cómo se generaron estas ondas de presión? Porque, a fin de cuentas, una onda sonora es exactamente una onda de presión que apelmaza y relaja la densidad de las partículas de la materia mientras va viajando por el espacio. Luego… empecemos por la materia.

Sabemos que en el plasma del Universo se había quedado dibujado el patrón de fluctuaciones cuánticas que se habían generado durante las primeras fases expansivas provocadas por el campo inflatón.[2] La tremenda aceleración hizo que estas fluctuaciones se extendieran por todo el Universo de una forma prácticamente homogénea. Y ya sabemos también que desde el mismo momento en que se frenó la energía expansiva del proceso y se transformó en materia distribuida homogéneamente por el Universo, ésta heredó el barniz de las fluctuaciones cuánticas iniciales. El tejido espacio-temporal del Cosmos había quedado como un mosaico de zonas con distintas densidades de materia, aunque bien es verdad que la diferencia entre unos y otros lugares era tan escasa que podemos imaginar al plasma primigenio como casi perfectamente homogéneo.

Si hacemos zoom sobre una cualquiera de estas zonas veremos dos tipos de materia: la bariónica, formada básicamente por protones, neutrones, electrones y neutrinos, y la materia oscura, que no sabemos realmente lo que es pero que abulta como cinco veces la bariónica. Realmente hay mucha materia oscura.[3] Gracias a la incesante expansión, las partículas de materia bariónica y de la oscura iban diluyéndose cada vez más en la menguante densidad del plasma. Cada vez les costaba más encontrarse e interactuar entre ellas, aunque eso no quería decir que no lo hicieran. Veamos lo que le sucedía a la bariónica.

Sus principales actores, los protones y electrones, junto con los fotones de la radiación que los bañaba, seguían yendo forzosamente de la mano, ya que no podían ir muy lejos unos de otros. Los protones de carga eléctrica positiva y los electrones negativos, aunque en las cercanías se movían separados, intercambiando cómplices guiños gracias a sus cargas opuestas. Los fotones que constituían la radiación del plasma aún tenían energía suficiente como para, al chocar con ellos, impedir la unión definitiva de cargas opuestas. Aunque con la

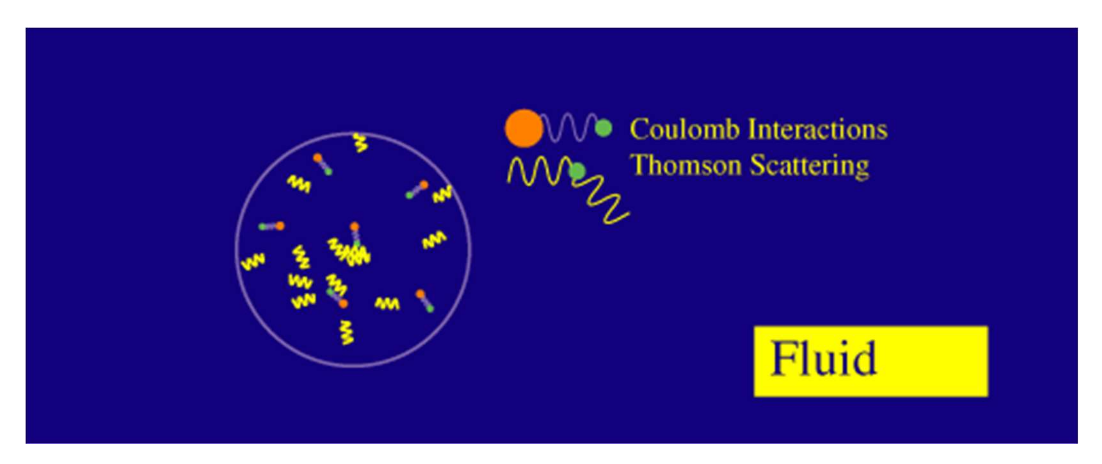
que tenían les sobraba como para interactuar con los electrones a través de choques dispersivos del tipo Thomson, tras los que el fotón salía en una dirección distinta a la que traía antes de la colisión, con la misma frecuencia pero habiendo perdido energía. Así, la radiación y la materia bariónica, unidas por el pegamento de los electrones, vivían un escenario de continuos choques y dispersiones, de forma que la primera -la radiación- era incapaz de volar libre e independiente.



Esquema de lo que sucedería en una burbuja de inestabilidad cuántica en el plasma primigenio mientras el Universo se expandía. Protones y electrones unidos por la fuerza de Coulomb mientras la radiación interfería a través de dispersiones de tipo Thomson (Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, fair use)

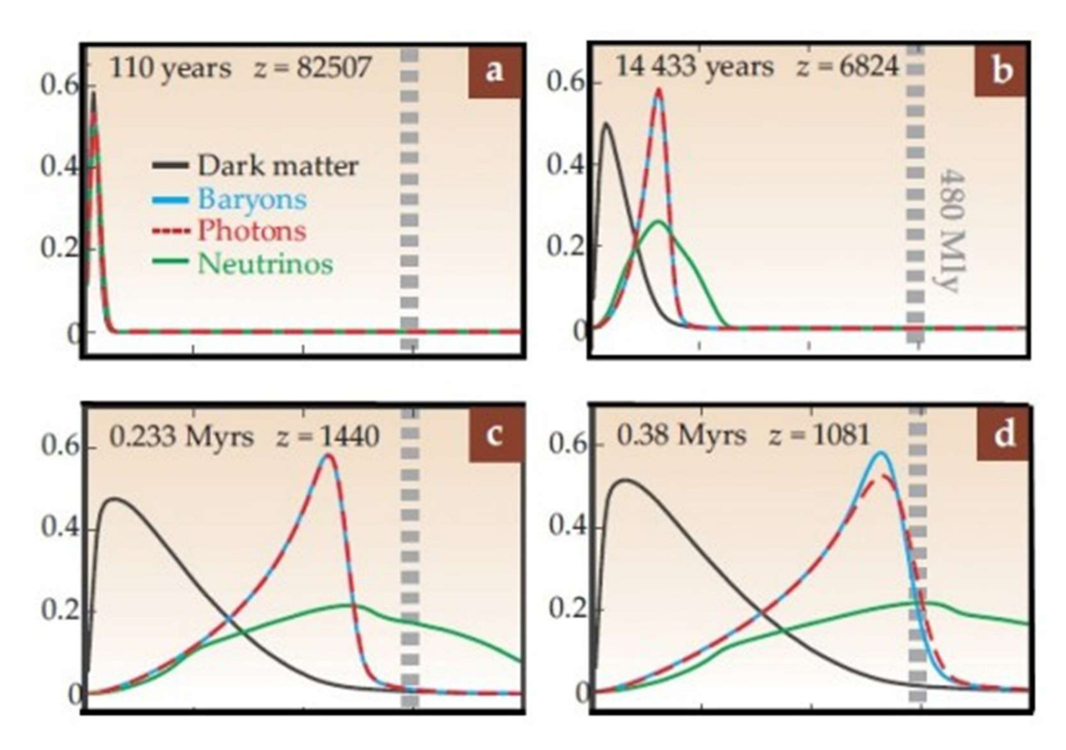
Con la materia oscura la vida era más tranquila, ya que, como hemos mencionado, tiene una propiedad particular, y es que no interactúa con el campo electromagnético: los fotones son incapaces de *verla*. De forma que este tipo de materia era transparente para la componente de radiación del plasma. El conjunto hacía que el plasma del Universo, durante una larga etapa, se comportara como una niebla espesa y opaca a la luz, con unos fotones cambiando continuamente de dirección choque tras choque. Algo muy parecido les pasa a los fotones generados en el interior del Sol, que tardan entre un mínimo de diez mil y un máximo de ciento setenta mil años en poder acercarse a la superficie de la estrella y escapar definitivamente de la materia.[4] Si hubiera habido forma de ver a aquel plasma desde fuera, cosa imposible, pues fuera del Universo se postula que no hay nada, no hubiéramos sido capaz de penetrar sus brumas y saber cómo era en su interior.

La gravedad estaba, desde luego, presente, y ejercía su acción compactando las partículas de materia, incluidas las de la materia oscura. En los puntos de la niebla de nuestro plasma-gas, que como resultado de las fluctuaciones cuánticas iniciales habían quedado más densos en materia, la gravedad actuaba **aglomerándola** aún más, incluso **absorbiendo** plasma-gas de sus alrededores. Lo cual hacía que en estas zonas especiales la densidad aumentara, las partículas se aceleraran y la temperatura se incrementara. Como consecuencia, la presión interna de la radiación allí presente se iba haciendo mayor al irse recalentando por la creciente compresión gravitatoria, hasta que llegaba a dominar y contrarrestar a la gravedad, iniciándose un proceso expansivo de la materia y la radiación acumulada. Como resultado de este proceso, se descomprimía la zona y se relajaba su densidad de materia. El proceso **sólo afectaba a la materia bariónica**, que era la que formaba la onda fugitiva, ya que, como hemos dicho, la materia oscura era transparente a los fotones. Podemos imaginar este proceso como semejante a lo que sucede en nuestra piscina cuando sumergimos una pelota y la soltamos: la pelota -*la materia bariónica y la radiación*- empieza a subir y bajar mientras se van propagando una serie de ondas concéntricas por la superficie del agua -*el plasma que formaba el Universo*-.



La burbuja de materia y radiación es comprimida por la gravedad para pasar luego a ser expandida por la presión que la radiación interior producía al haberse incrementado en el proceso de compactación. Por la imagen parece que el fenómeno fuera cíclico, aunque sólo intenta representar armónicos de diversas frecuencias (Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, fair use)

Motorizado por la expansión del Universo, un frente de onda esférico de materia bariónica se alejaba del punto inicial donde se había generado arrastrando con sus protones y electrones a una radiación muy caliente. En el centro relajado quedaba una materia oscura, que seguía comprimiéndose gracias a su propia gravedad, y una radiación menos energética, más fría. El proceso general queda reflejado en la secuencia de imágenes siguiente. Cada una representa la situación de la burbuja en un momento determinado de la vida del Universo, con la distribución de materia y energía que habría en su interior. Acaba en el año 380.000 que es cuando la radiación se evade finalmente de la materia, cosa que explicaremos con detalle en otro capítulo.



Evolución de la onda sonora del plasma a través del tiempo. Z es el corrimiento al rojo y 480 Mly (millones de años luz) el tamaño final actual de la burbuja conocido como horizonte acústico (de todo ello hablaremos con más detalle en otro momento de esta serie). Con respecto al eje horizontal, el tamaño relativo de las curvas indica el radio de la burbuja en cada momento. En el eje vertical se indica la densidad de la perturbación (Imagen: Daniel Eisenstein, fair use)

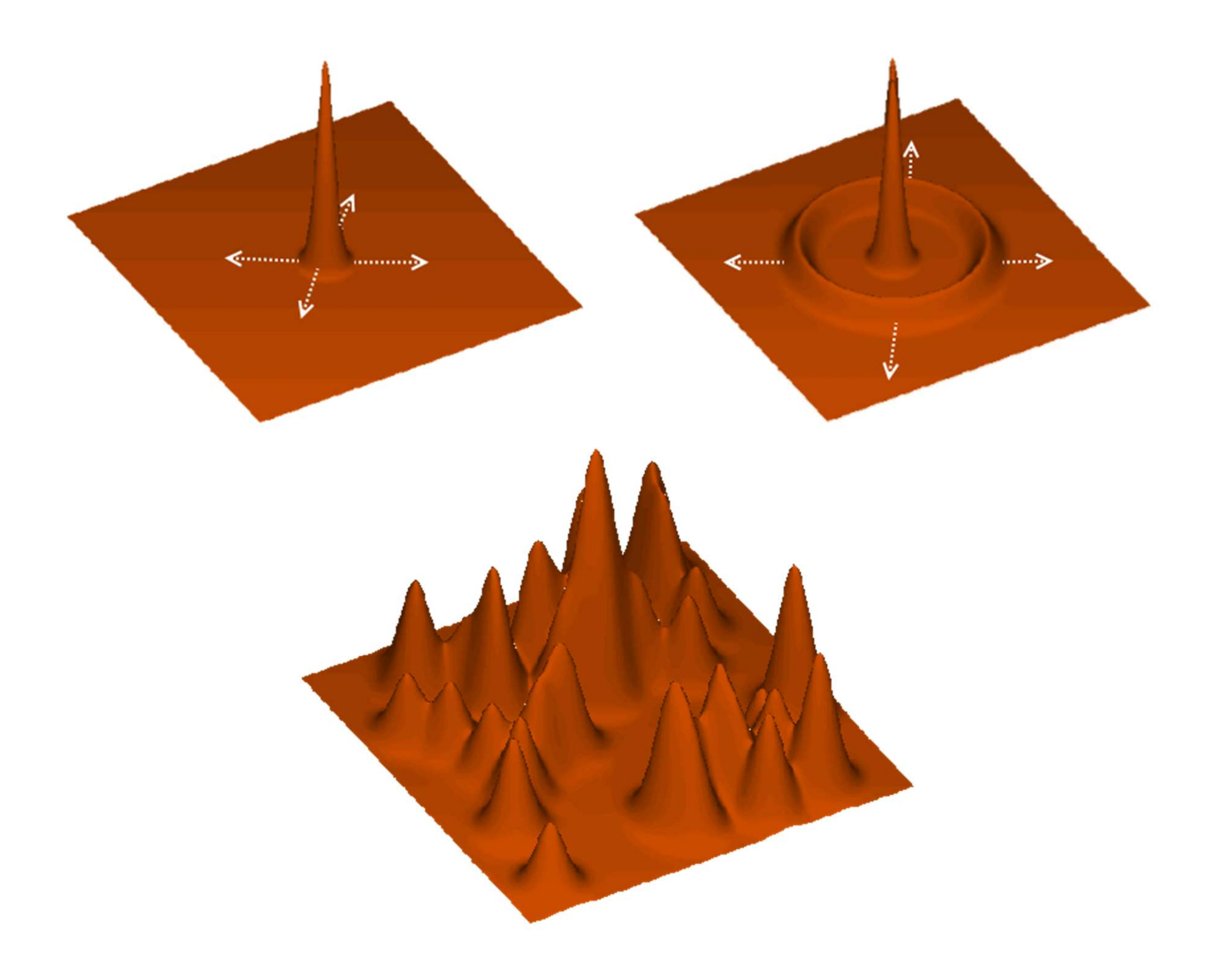
En la figura anterior se pueden ver cuatro estadios temporales diferentes de una onda sonora esférica correspondiente a la zona particular de una fluctuación cuántica inicial, cargada en origen con

materia oscura y bariónica. Vemos cómo a los 14.000 años ya se habían desacoplado ambos tipos de materia, iniciando la bariónica la cresta de la onda esférica. Con el tiempo se va estabilizando hacia su máximo alcance -*horizonte acústico*-, indicado con la barra vertical de trazos grises. El efecto gravitatorio de la materia bariónica afecta a la materia oscura que había quedado en el centro de la perturbación inicial y arrastra a la última en cierta medida hacia fuera. Mientras, se ve cómo los fotones van acompañando al frente de onda bariónico y sólo empiezan a desacoplarse cuando llega la edad de 380.000 años.

Esto sucedía en mayor o menor grado en todos los puntos del plasma. Dependiendo de sus densidades particulares, resultado de las condiciones de la fluctuación cuántica que allí se había producido durante la inflación, cada una de las ondas generadas de partículas bariónicas y de radiación esclava presentaban su propio patrón. Todas ellas coincidían acopladas en el tejido del espacio-tiempo, por lo que al interferir espacialmente unas con otras hacían del plasma un mar embravecido cruzado por un patrón de ondas heterogéneo. Crestas elevadas de materia oscura y otras menores de materia bariónica. No en vano la primera era en masa unas cinco veces la segunda. Y todo esto incansablemente a lo largo de 380.000 años, momento que entenderemos su porqué en el siguiente capítulo.

Como resultado de la dinámica anterior podemos imaginar que cada punto de nuestro Universo, según sus características de densidad y temperatura, se comportaba como un oscilador resultado de los procesos de compresión y descompresión. Lo podemos imaginar como algo semejante a lo que sucede en la superficie del agua cuando se tira una piedra: las moléculas se apelmazan y distienden a medida que la onda va extendiéndose en circunferencias concéntricas. Y cada punto se comporta como un oscilador, acumulando y relajando energía. Lo mismo pasa con el aire cuando se produce un grito que lo comprime: el fenómeno es exacto al descrito para el agua, aunque en este caso las ondas no se ven y sólo se escuchan cuando llegan al oscilador de nuestro oído.

Es lo que hemos llamado ya tantas veces antes de ahora, a lo largo de estos capítulos, las **ondas sonoras** del Universo primigenio.



Creo que las imágenes anteriores[5] pueden permitirnos imaginar bastante bien el proceso que un poco más arriba nos habíamos atrevido a describir como "…*un mar embravecido cruzado por un patrón de ondas heterogéneo*". Las dos de arriba hay que verlas de forma correlativa como un inicio del pico de onda que con el tiempo se va extendiendo hacia afuera del centro donde se originó, lo que corresponde a la de una sola burbuja generada en un particular punto del plasma. Mientras que en la segunda se simulan los vaivenes del conjunto de ellas en todo el espacio.

Creo que ahora podemos entender bien la analogía que hacía con una obra musical. En ella cada instrumento, con su timbre y color característico, genera su patrón de ondas y frecuencias, generando con su dinámica conjunta una fantástica armonía. El Cosmos también tiene sus instrumentos en la diversidad local de la densidad de su plasma: cada uno de los puntos que habían emitido su particular onda de materia bariónica era uno de ellos, que al sonar acoplados

generaron un vaivén musical,[6] quizás cacofónico para nuestros gustos, pero que no deja de ser su melodía.

En este punto en que nos acabamos de encontrar con el susurrar de la música primordial del Universo primitivo vamos a hacer un intermedio. El reposo nos ayudará a asimilar el concepto antes de avanzar en su teoría a lo largo del siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 15:

1. Eso sería al final de esos 380.000 años. Añado aquí un sencillo cálculo para que nos hagamos idea: Sabemos que la composición de átomos en aquel momento era básicamente de 75% de hidrógeno y 25% de helio 4, por lo que un átomo medio pesaría [0,75 x 1 + 0,25 x 4]= 1,75 unidades de masa atómica (*uma*). Cada *uma* equivale a 1,7 x 10^{-27} kilogramos, luego la densidad sería 1,75 uma/cm^3 x 1,7 x 10^{-27} kg/uma x 10^3 gr/kg x 10^3 átomos ≈ 3 x 10^{-21} gramos/ cm^3. Por comparar: en condiciones normales la densidad del agua es de 1 gramo/ cm^3 y la del aire, 1,4 x 10^{-3} gramos/ cm^3.
2. Podéis repasar el tema releyendo el capítulo 05 de este libro.
3. Como veremos en un futuro capítulo, esa realidad no es una entelequia, y aunque no interactúa con el campo electromagnético, y por tanto no la podemos ver, sí que la hemos sabido medir por métodos indirectos.
4. Podéis leer al respecto el siguiente artículo de la NASA:

   [https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php]

5. Extraídas de este artículo de Scienceblogs:

   [http://scienceblogs.com/startswithabang/2008/04/25/cosmic-sound-waves-rule/]

6. Podéis oír esta cacofonía en la recreación del eco de la sinfonía del Universo tras la emancipación de los fotones a los 380.000 años de vida. En el enlace de más abajo John G, Cramer, profesor de la

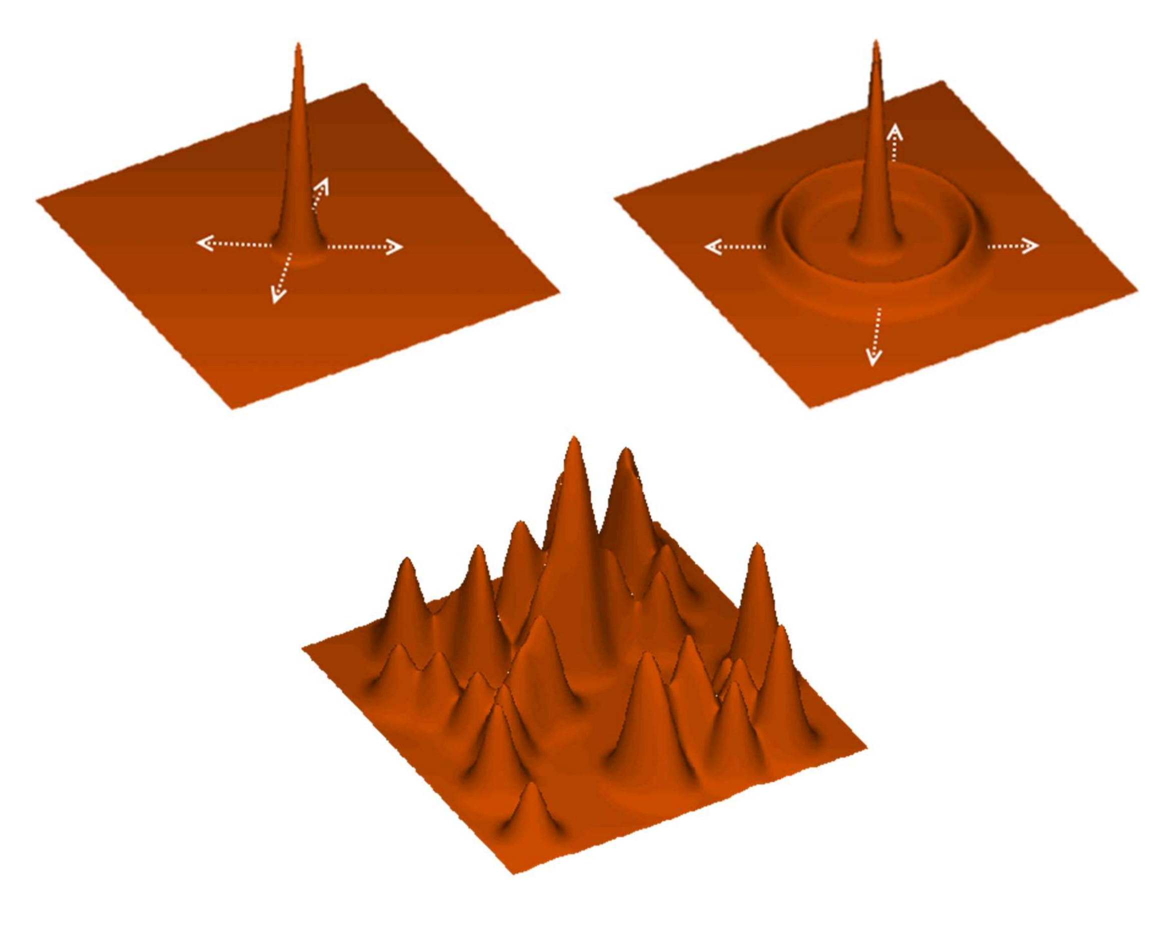
Universidad de Washington, explica qué hizo para obtenerlo y por qué lo hizo.

[http://faculty.washington.edu/jcramer/BBSound_2013.html]

16: La sinfonía del Universo II

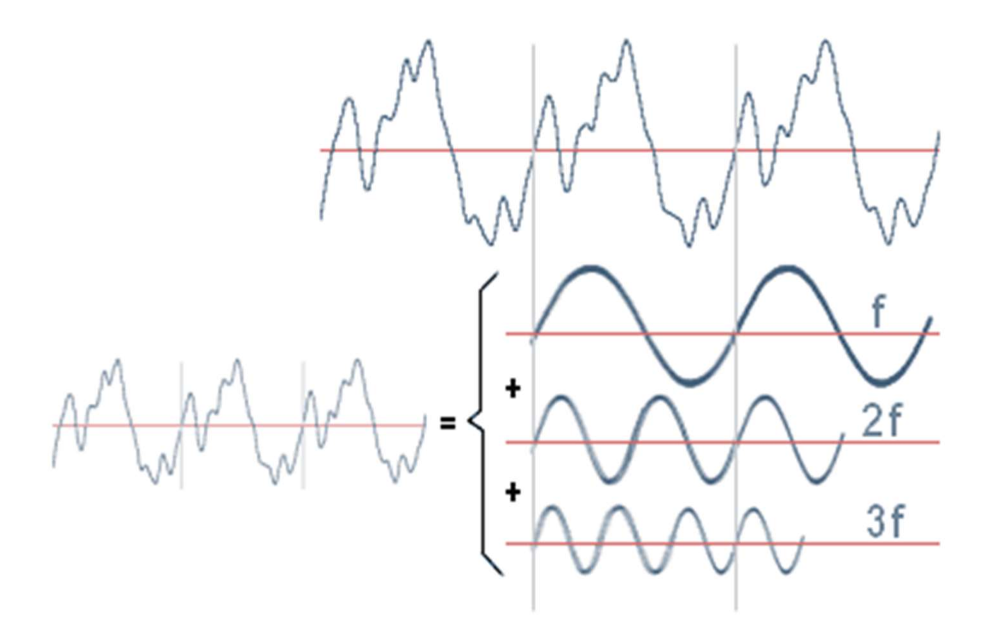
a lo largo de los primeros 380.000 años

En el capítulo anterior descubrimos cómo el Universo, a lo largo de sus primeros 380.000 años, estaba compuesto por un plasma que perdía progresivamente su densidad por causa de la continua expansión que experimentaba el tejido espacio-temporal de base. Decíamos también que este plasma estaba rielado por una serie de ondas sonoras, consecuencia de las ondas de presión que generaban los movimientos de la materia. **Una sinfonía cósmica**. Repito la imagen que ya se propuso en el capítulo anterior y que nos daba una buena idea de cómo las ondas particulares -imágenes de arriba-, generadas gracias a la acción-reacción de la gravedad-radiación en una fluctuación cuántica primigenia local, se superponen -imagen de abajo- para crear esta particular sinfonía global.[1]



Vayamos a por harina e intentemos entender su armonía. Porque si conseguimos distinguir en los acordes de esta melodía los violines de los oboes, los distintos instrumentos de su plantilla, quizás comprendamos mejor su ser. Para ello necesitamos introducir ciertos conceptos elementales de la física de los sonidos y de las matemáticas que la soportan. Que no cunda el pánico: seré muy suave.

La figura siguiente representa una curva cíclica, no muy alejada de lo que puede ser la onda sonora de un instrumento musical, generada al tocar una determinada nota. Tiene un perfil periódico pero presenta una variación muy aleatoria a lo largo de este periodo. En principio puede parecer un galimatías caótico, aunque gracias a las matemáticas podemos hacer con ella una abstracción y descomponerla en un sumatorio de ondas perfectamente sinusoidales, cada una de ellas con una frecuencia el doble de la anterior, siendo la primera, la de mayor longitud de onda (f), lo que se suele conocer como la **frecuencia fundamental**.

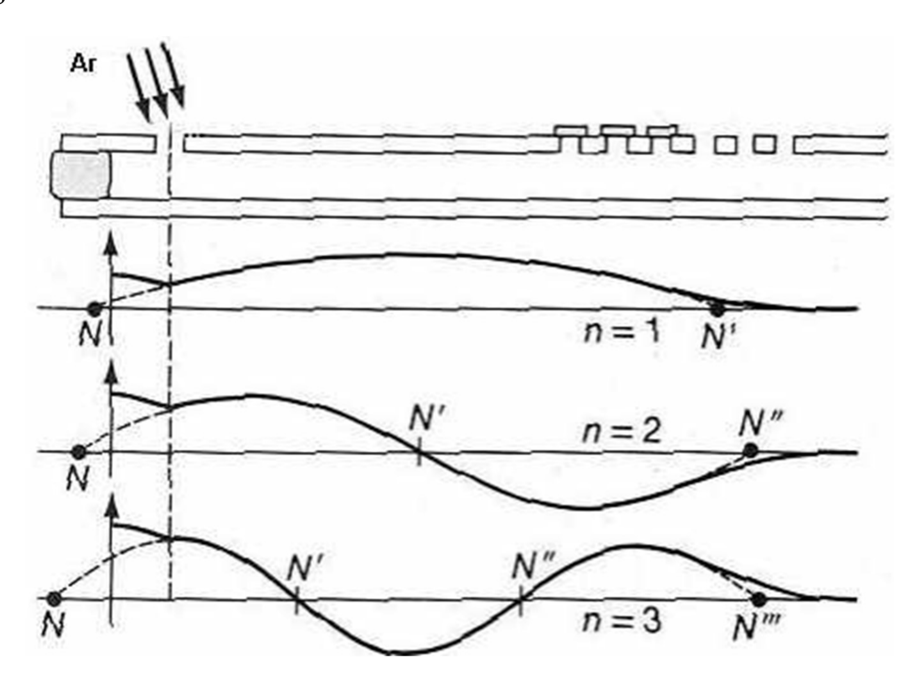


(Imagen obtenida de la red, fair use)

Este artificio matemático, conocido como la descomposición en series de Fourier, se puede aplicar a cualquier tipo de sonido, movimiento ondulatorio o variación periódica y repetitiva. Por lo tanto, también nos va a servir para analizar las ondas sonoras del plasma del Universo inicial, lo que nos va a permitir sumergirnos en la información que lleva en sus patrones. Pero ¿de dónde sacamos un

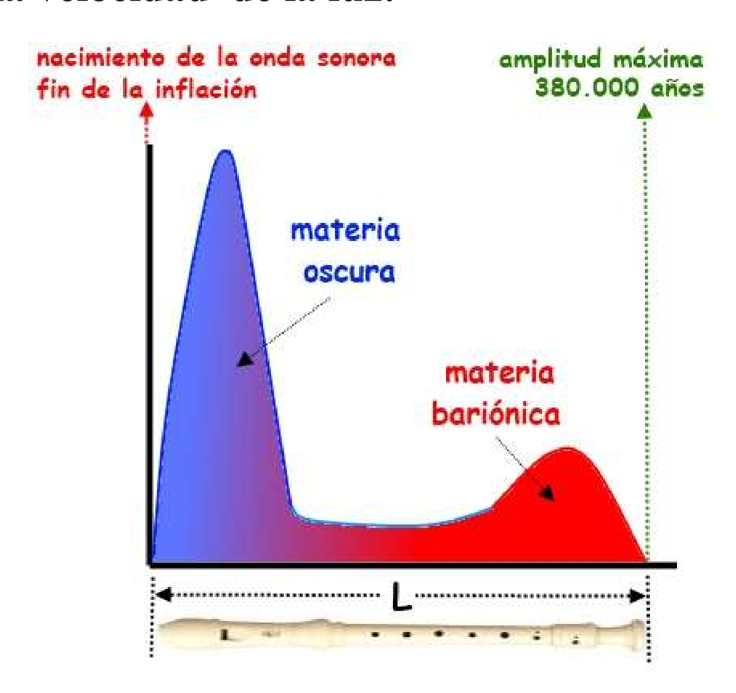
patrón de ondas del Universo que nos sirva de base para el estudio? Un poco de paciencia… es algo que veremos en el siguiente capítulo.[2] En ésta seguiremos un poco más con la teoría, intentando caracterizar cómo son las ondas de la música del Cosmos.

La Acústica Musical define como *tubo abierto* aquel que tiene dos o más orificios. Hay muchos instrumentos que cumplen el modelo. Centrémonos, por ejemplo, en una flauta: se sopla por un orificio y sale el aire -cargado de sonido- por otro. Realmente sale el aire con un patrón de compresión, ya que el sonido, la sensación, se produce más tarde tras un fenómeno mecánico y neuronal en nuestras cabezas. La teoría dice que en la flauta se produce una *onda de presión sonora fundamental* con una *longitud de onda doble a la longitud de la flauta*. Se trata del armónico fundamental que comentábamos antes. Además, le acompañan otros armónicos, cada uno de longitud de onda N_i veces la de la fundamental.[3] O lo que es lo mismo, el *segundo*, con una frecuencia *doble* de la fundamental, el *tercero*, *triple* de la fundamental, y así en los sucesivos. Gracias a la figura siguiente, que corresponde al corte de una flauta, podemos hacernos una mejor idea.



Esquema de una flauta en la que se ha abierto el cuarto orificio obteniéndose la serie de armónicos de abajo (Imagen obtenida la red, fair use)

Este comportamiento físico lo podemos extrapolar al Universo, que se comportó en su periodo *sinfónico* como un conjunto de flautas. La diferencia entre una flauta y el universo es que las ondas en la flauta son conformadas por la longitud, mientras que en el Universo se consideran en el tiempo. Ya sabemos que esas últimas, arrastradas por la propia expansión del Universo, se comportaban como un punto en expansión espacio-temporal que iba conformando una especie de burbuja esférica, en cuya superficie se iba manifestando una presión cambiante con el tiempo. Si la seguimos a lo largo de su trayectoria temporal podemos imaginar que iba dibujando una onda de presión. Son las ondas esféricas de materia bariónica y radiación, ondas que el juego motor "compresión gravitatoria-presión de la radiación relajadora" estaba generando en cada punto del plasma del Cosmos desde el primer momento tras la inflación. Estas ondas en el plasma-gas eran físicamente similares a una onda sonora, por lo que tenían que desplazarse a la velocidad del sonido. Y a pesar de la escasa densidad a lo largo de la mayor parte de la época del plasma, ya que un poco antes de las tres horas de vida el Universo ya era menos denso que el aire, la velocidad del sonido en este medio era elevadísima gracias a la energía -mucha presión que dificultaba el movimiento- que incorporaba la abundante radiación.[4] De hecho, avanzaba casi **¡al 60% de la velocidad de la luz!**[5]



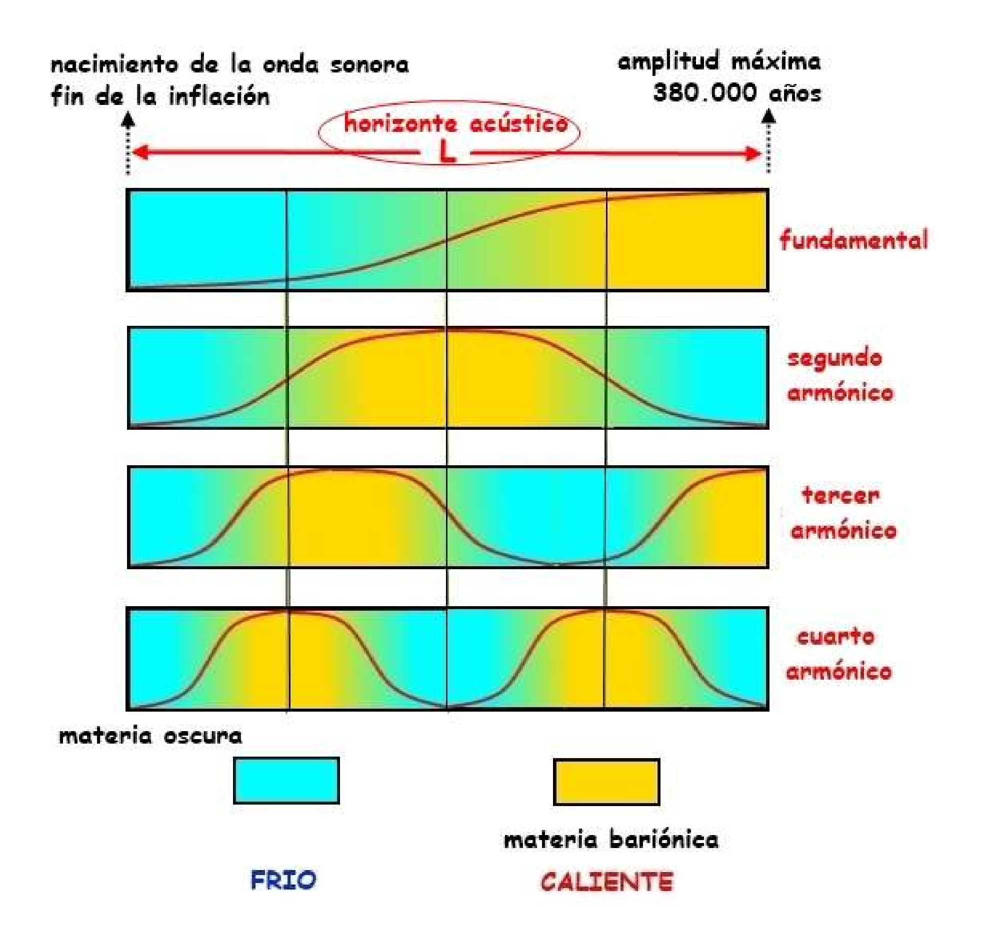
La orquesta cósmica está compuesta por millones de estas flautas

Recordamos también que al iniciarse en el mismo momento temporal en todos los lugares, todas las ondas de todos los puntos del plasma estaban acopladas. Cabalgando sobre la dinámica expansiva del tejido espacio-temporal y sobre su propia dinámica centrífuga con la que transportaba materia bariónica, cada una de ellas se iba haciendo más amplia con el tiempo, dilatando su longitud, lo que era lo mismo que decir que su "tubo" acústico se iba haciendo progresivamente más largo. De forma que a los 380.000 años, por el fenómeno que describiremos en el siguiente capítulo[6] y que tiene relación con el fin del plasma tal como lo habíamos conocido hasta ahora, el "tubo" llegó a su máxima longitud, exactamente la longitud que el "sonido" había podido recorrer en esos años, aproximadamente unos 440 mil años luz.[7] En una palabra: nuestra gran flauta cósmica. Miles y miles de ellas superpuestas.

Podemos imaginar a cada onda sonora del plasma como compuesta por su combinación de armónicos. Y podemos pensar a cada uno de ellos con vida independiente. En cada uno de ellos los valles correspondían a las zonas que habían quedado con mucha materia oscura y poca materia bariónica, la cual estaba concentrada en los puntos cresta de los armónicos. Las crestas estaban calientes, porque allí la radiación estaba chocando continuamente con los bariones, mientras que los valles estarían en contraste más fríos, ya que fotones y materia oscura no interactuaban.

Con este patrón de ondas y el consiguiente de distribución de materia podemos imaginar algo así como que el Cosmos era un mosaico romano, un mosaico dibujado por la materia bariónica acompañada de la radiación, sobre un sustrato director de materia oscura. En una segunda derivada lo podemos entender como un mosaico térmico, lo cual nos facilita mucho el estudio de la radiación de fondo de microondas. El patrón de dibujo que generaba cada frecuencia era modificado por la siguiente de menor amplitud que la anterior. Donde una cargaba materia, la otra la descargaba. Así una tras otra.

La figura siguiente intenta aclarar estos patrones de alternancia entre armónicos pares e impares.



A medida que avanzaba el tiempo la onda se ampliaba por el espacio del Universo, haciéndose su longitud L mayor. El Cosmos era la superposición de los efectos de todos sus armónicos, cada uno de mayor frecuencia y menor amplitud -aunque el dibujo no sea coherente con esto último-, que matemáticamente parecían tener vida propia.

El conjunto sumado corresponde a la aportación de una determinada onda-esfera a la fotografía del Universo a la edad correspondiente a una L determinada. Como intenta expresar la figura de arriba, cada uno de los armónicos de la onda sonora tenía una longitud de onda menor que el anterior. Así que, en algunas zonas, la concentración de materia bariónica que había acumulado -en una ficción matemática- el armónico fundamental se veía matizada por la relajación que había sido creada en las oscilaciones “gravitación-presión de radiación” de los armónicos pares o por el reforzamiento que introducían las de los impares. A mayor densidad bariónica, mayor densidad de radiación y, por tanto, mayor temperatura. La anterior figura nos permite hacernos una idea visual de cómo el armónico fundamental fue el que generó la mayor diferencia posible de temperaturas entre dos puntos

cualquiera del mapa del Cosmos. Estos puntos estaban separados por una distancia L, que era el radio de nuestra onda-esfera de sonido, el espacio que había corrido el frente de materia a lo largo de los 380.000 años a la velocidad del sonido.[8]

Una conjunción de armónicos en una onda, una conjunción de ondas en el espacio… un Universo grumoso de materia con unos patrones de temperaturas acordes con ello. Un plasma convulso con cada vez menos energía, en donde se estaban gestando las semillas de la futura estructura a gran escala del Cosmos. Y llegó la fecha talismán, 380.000 años de edad, cuando la energía promedio por partícula rondaba los 0,25 eV y la temperatura era semejante a la de la superficie de nuestro Sol. La sinfonía llegó a su acorde final. Entonces… ¡¡¡FLASH!!!

El momento es mágico… lo dejo en el aire y aquí dejo este capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 16:

1. El pico central corresponde inicialmente a toda la materia, bariónica y oscura, más la radiación. Con el tiempo va quedando en el centro un pico de materia oscura con una excursión de la bariónica y la radiación hacia el límite de la onda, cuyo radio crecía al ritmo de la expansión del Universo.

   Imágenes extraídas de este artículo de Scienceblogs:

   [http://scienceblogs.com/startswithabang/2008/04/25/cosmic-sound-waves-rule/]

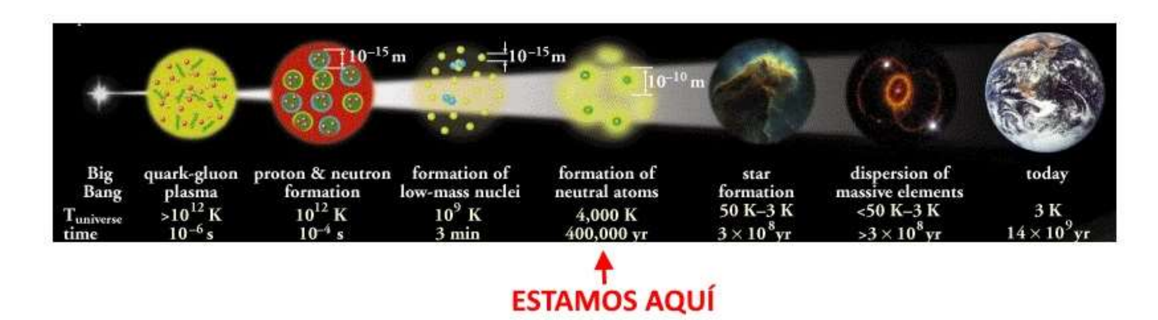
2. Adelanto aquí que este patrón se obtiene del estudio del mapa de radiación de fondo de microondas. Este último está formado por los fotones que escaparon de la materia allá por el año 380.000 de la vida del Universo.
3. N_i es un número entero que va desde un valor 2 hasta, en teoría, infinito, aunque mucho antes se amortiguan tanto los armónicos que se hacen inaudibles.

4. Recordemos que en el relajado Universo tras la nucleosíntesis llegaba a haber unos 10^9 fotones por cada barión.
5. Realmente a $c/\sqrt{3}$.
6. Ya adelanto en este pie de página que se trata del momento conocido como de la **recombinación**, cuando los electrones se acoplaron a los núcleos dejando a los fotones en libertad. Estos últimos son precisamente los que conforman lo que llamamos **radiación de fondo de microondas**.
7. No liarse con la cifra dada en una imagen más arriba de 480 millones de años luz, que es el tamaño que tiene el horizonte acústico hoy. Pero en el momento de la recombinación el universo era unas 1.100 veces más pequeño, por lo que la longitud del horizonte acústico entonces era de los 440 mil años luz mencionados en el texto.
8. Advierto que aquí la velocidad del sonido no es de 340 m/seg, que es aquella con la que se propaga por el aire. En el Universo se propagaba a través de un plasma que pasó de ser más denso en materia que el aire a ser menos denso, pero siempre con una densidad de energía que ralentizaba el movimiento de las ondas de presión.

17: El big flash

a los 380.000 años desde el inicio

Nos disponemos a abrir una nueva página crucial para el conocimiento de nuestro Universo, una nueva página de la historia descrita como la Biografía del Universo. En el capítulo anterior lo habíamos descrito con un ¡FLASH!… pero ahora voy a ser un poco más exagerado, porque me atrevo a ponerle la etiqueta de ¡BIG FLASH! Como allí dijimos, el Universo estaba completando una larga sinfonía iniciada en su segundo t^{-35} de vida. Llegaron los últimos compases que conformaron la coda final del primer movimiento en la Sinfonía del Universo.[1] Está a punto de iniciarse el último tema musical… 380.000 años después se va a completar la obra con la aparición liberadora de los átomos libres interpretando una fanfarria de metales. Después sólo quedaría la reverberación de su eco. Aunque… ¡menuda reverberación!



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

CODA

La energía promedio de las partículas del Universo estaba alcanzando las decenas de eV. Es ya lo suficientemente baja como para que el campo de la fuerza electromagnética, con sus fotones, pudiera intervenir en un mundo de partículas y elementos, muchos de ellos con carga eléctrica. Hasta entonces, las velocidades de los actores -núcleos, protones, electrones y, sobre todo, la de los fotones- habían sido tan altas que en los múltiples choques entre ellos no habían

tenido tiempo para que los que tenían cargas opuestas se unieran. La energía de unión entre un protón positivo y un electrón negativo[2] es del orden de 13,6 eV. Así que, cuando los fotones, siguiendo el camino de enfriamiento general, “estiraron” su longitud de onda por debajo de estos niveles energéticos,[3] ya no tuvieron fuelle suficiente y tuvieron que dejar de hacer lo que habían hecho hasta entonces: “molestar” a los electrones a través de las pertinaces dispersiones de tipo Thomson.[4] A pesar de la baja densidad, seguramente los electrones, con su cohorte de fotones, se debían desplazar muy cerca de los protones debido a la atracción electromagnética que había entre ambos tipos de partículas. Por lo que, vencida la frustrante insistencia de los fotones, los electrones cayeron en brazos de los núcleos que mostraban el anzuelo de la carga positiva de sus protones. Esto sucedió más o menos hace unos 380.000 años tras el Big Bang, cuando la temperatura del Universo llegó a ser del orden de los pocos miles de Kelvin, tres o cuatro mil, parecida a la de la superficie de nuestro Sol.[5] Había llegado la época conocida como “de la **recombinación**”, cuando se formaron los **primeros átomos** estables -de hidrógeno, helio, litio y poco más- dejando como resultado a un remanente de abundantísimos fotones de 0,25 eV, que pudieron “volar” libres por primera vez sin encontrar apenas ningún impedimento. El cielo se había vuelto transparente y lleno de luz del rango infrarrojo, cercano al visible para el hombre, si es que alguno hubiera habido por ahí.

¡¡¡FLASH!!!

Después de esto, el Universo quedó de tal forma transformado que nunca más volvió a ser el mismo. **La densidad de energía de la radiación se escondió en un sutil fondo dejando la batuta a la densidad de energía de la materia**. Esto hizo que la expansión del Universo teóricamente perdiera impulso, ya que en el mismo tiempo que antes crecía en un factor de dos, a partir de ahora lo hará sólo en un factor de 1,5. Las ondas sonoras que movían al plasma de forma grumosa antes del flash se congelaron, dejando el particular patrón de masa bariónica y de masa oscura que ya conocimos en el capítulo anterior. Y que será lo que con el tiempo irá definiendo la arquitectura y las estructuras del Universo de hoy.

Aquello no fue como un fogonazo de transparencia, aunque realmente nos guste imaginarlo así. Duró su tiempo. Pero ese flash lo hemos podido fijar con nuestros magníficos instrumentos COBE, WMAP y Planck,[6] y así disfrutar de la primera fotografía de infancia de nuestro Cosmos: la que recoge a aquellos fotones en el mismo instante en que huyeron de la materia a 3.000K, hace más de 13.400 millones de años, y que ahora llegan a nuestras cámaras. Llenan el Universo entero y vienen de todos los lados. Aquí está la foto.

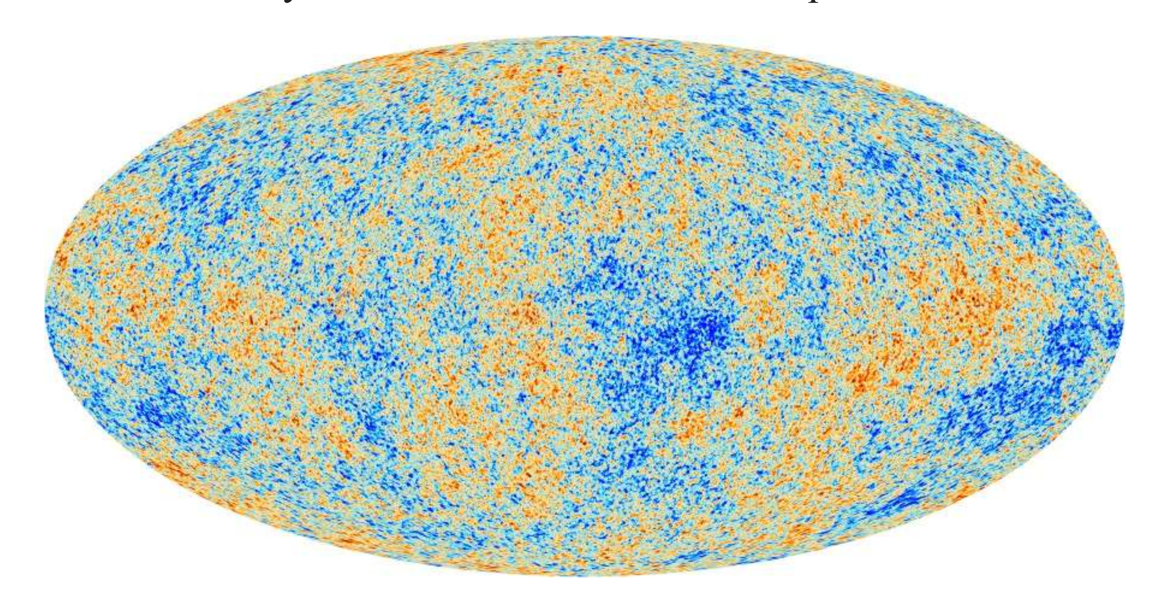


Imagen de la radiación de fondo de microondas obtenida por el satélite Planck: los fotones que escaparon cuando la época de la recombinación (Imagen: European Space Agency, ESA, non-commercial use)

En la foto, cada color es una clave de la temperatura de su estructura. Pero vayamos por partes y contemos toda su historia.

Los fotones pudieron moverse con libertad por el Universo portando una energía de 0,25 eV, ya metidos en las frecuencias infrarrojas. Así que no hubiéramos visto ningún destello luminoso. Algunos chocaban con los recién estrenados átomos de hidrógeno, pero no podían ionizarlos, ya que para hacer saltar al electrón se necesitaba una energía igual a la de unión protón-electrón en el hidrógeno, 13,6 eV. Para ello habrá que esperar mucho más tarde, cuando en los procesos de fusión nuclear en el interior de las primeras estrellas se generaron fotones con la energía necesaria.[7] Comenzaba la época conocida como de la **gran oscuridad**, que iba a durar hasta que se

encendieran las primeras estrellas unos pocos cientos de millones de años después.

El momento de la recombinación fue el de la segunda "manumisión" masiva. La primera la habían protagonizado los neutrinos cuando casi había pasado un segundo en la vida del Universo.[8] Tras aquel viejo momento que había sucedido cuando el Universo tenía menos de un segundo, la aniquilación mutua de los electrones y los positrones había transformado su materia-antimateria en energéticos fotones, aportando energía al conjunto de la radiación. Es por eso que esa segunda "manumisión", la de los fotones, fue mucho más energética que la primera protagonizada por los neutrinos. De ahí que hayamos podido con la tecnología de hoy en día detectar este ubicuo mar de fotones, cosa que no tenemos ni idea de cómo hacer con los neutrinos, aunque bien es verdad que estos son mucho más esquivos. Los fotones de la recombinación están ahora por todas partes, mucho más "fríos" que entonces al haberse suavizado su longitud de onda a la par de lo que se iba expandiendo el Universo.[9] De forma que hoy son los constituyentes de una radiación de fondo en la frecuencia de microondas, con una energía equivalente a los 2,725K.

La imagen anterior corresponde a estos fotones perdidos. Salieron hace 13.400 millones de años -tiempo pasado desde la recombinación hasta hoy- desde una cáscara de Universo que se encuentra ahora en el límite de lo observable por nosotros, a 46.500 millones de años luz.[10] Hay que decir que no hay contradicción entre las dos cifras, 13.400 y 46.500 millones de años luz, ya que la mayor incorpora no sólo el tiempo de viaje sino también el efecto de la expansión del Universo. La imagen que hemos presentado obtenida por la sonda Planck es una fotografía de hoy, pero que no deja de ser un modelo a escala de la fotografía más antigua que podemos hacerle al Universo. A nuestro Universo observable. ¡Una foto venida del año 380.000 de la vida del Universo! Ya hemos dicho que cada color corresponde a fotones de una determinada longitud de onda, que es equivalente a hablar de energía-temperatura. Donde había una mayor densidad de materia los fotones liberados tenían una mayor energía ya que allí se producían más interacciones. Donde la densidad era menor, los fotones liberados eran de menor energía.

A la vista de las irregularidades en la imagen de la radiación de fondo de microondas puede parecer que el proceso no fue muy homogéneo, pero realmente entre unos puntos y otros hay diferencias máximas de tan sólo una parte en 100.000. Es como si la superficie de una piscina olímpica de 50 metros se estuviera moviendo con olas de 0,5 milímetros. Inapreciable.

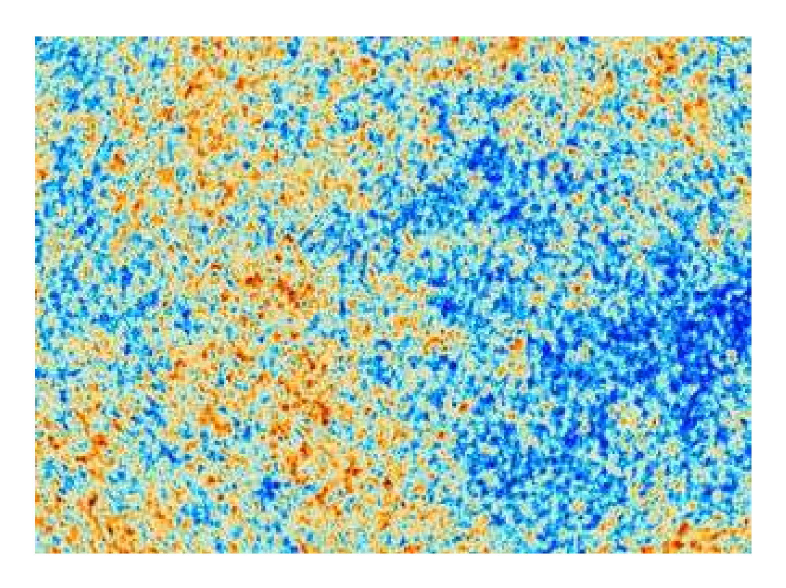
Pero volvamos nuestros ojos a un matiz que quizás se nos haya escapado. La foto dibuja en cada punto la longitud de onda de los fotones que de allí proceden, es decir, corresponde a la energía de estos fotones en este punto. Hemos dicho que a mayor energía del fotón mayor concentración de la materia. Luego el punto con mayor temperatura de su fotón es el punto con mayor densidad de energía-materia. La foto de la radiación de fondo de microondas **es sencillamente la foto de la distribución de la materia en el Universo** cuando tenía casi cuatrocientos mil años.

Vamos a dedicarle un poco de tiempo a lo que nos dice esta imagen. Realmente corresponde a una proyección cartográfica plana del tipo Mollweide de la esfera celeste o del cielo nocturno.[11] En esta especie de elipse está representada la totalidad del firmamento visible, lo que un día cualquiera nosotros podemos ver si miramos al profundo cielo en todas las direcciones de donde nos viene luz. Pero que se le ha manipulado un poco. Eliminemos la luz solar que oculta a los pequeños focos que nos interesan. Eliminemos también la de las estrellas y galaxias, sobre todo la de la Vía Láctea. La luz remanente que nos queda tras esta acción de borrado son los fotones de la radiación de fondo que proceden de la lejana superficie de la esfera de la recombinación.

Con nuestro ojo, que no olvidemos que es un aparato biológico para detectar fotones, no los vemos, ya que la frecuencia de esta ancestral luz queda muy alejada del espectro visible, está en el rango de las microondas.[12] Pero el hombre, como animal insaciablemente curioso e inteligente, ha ido ideando métodos para detectar a estos fotones, mejorando sus aparatos de percepción de la luz, desde la rudimentaria antena con la que Penzias y Wilson en 1965 descubrieron de una forma muy rocambolesca[13] los fotones del fondo de microondas, hasta los modernos satélites como el COBE, el

WMAP o el Plank que transportan unos telescopios con resoluciones fantásticas. La foto que obtuvieron nuestros dos pioneros descubridores era monocromática… para ellos y su tecnología todos los fotones del fondo eran de la misma energía. La resolución fue progresivamente mejorando con las tres sondas mencionadas.

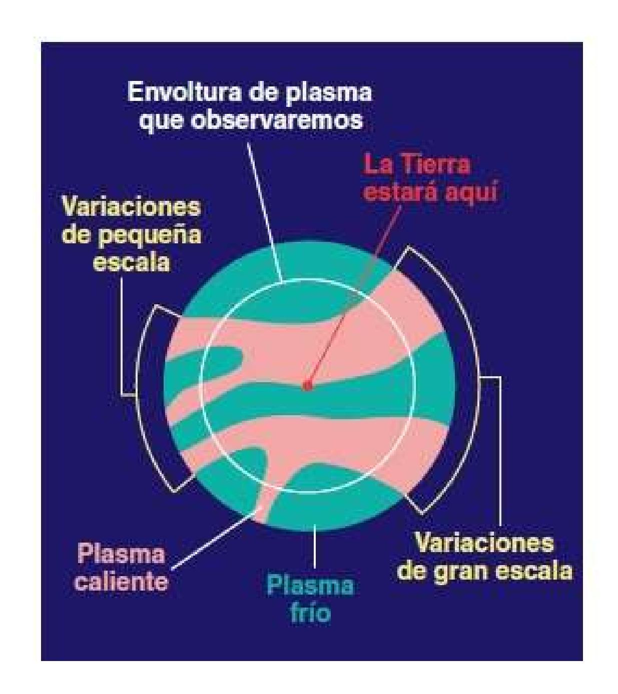
Y al igual que la foto de nuestros tatarabuelos nos permite saber cómo eran ellos, las tomadas por COBE, WMAP y Plank nos permiten saber cómo era el Universo de 380.000 años.



Detalle de la foto de la radiación de fondo de microondas tomada por Planck (Imagen: A partir de European Space Agency, ESA, non-commercial use)

La imagen anterior es un detalle de las anisotropías del fondo de microondas tal como lo que nos han dicho nuestros satélites. Una vez más repetiremos que los colores son simplemente una referencia cromática artificial de las “temperaturas-densidades de masa”. Parece como que realmente vemos el reflejo de las ondas sonoras esféricas que se transmitían en el antiguo plasma a velocidades del sonido y que quedaron congeladas en el momento de la recombinación. Son perfectamente imaginables los grumos dibujados por los armónicos fundamentales que marcaban la separación entre las zonas de mayor densidad de las de menor densidad. La foto real de nuestro Universo visible.

La imagen esquemática siguiente nos va a permitir hacernos una mejor idea de ello.



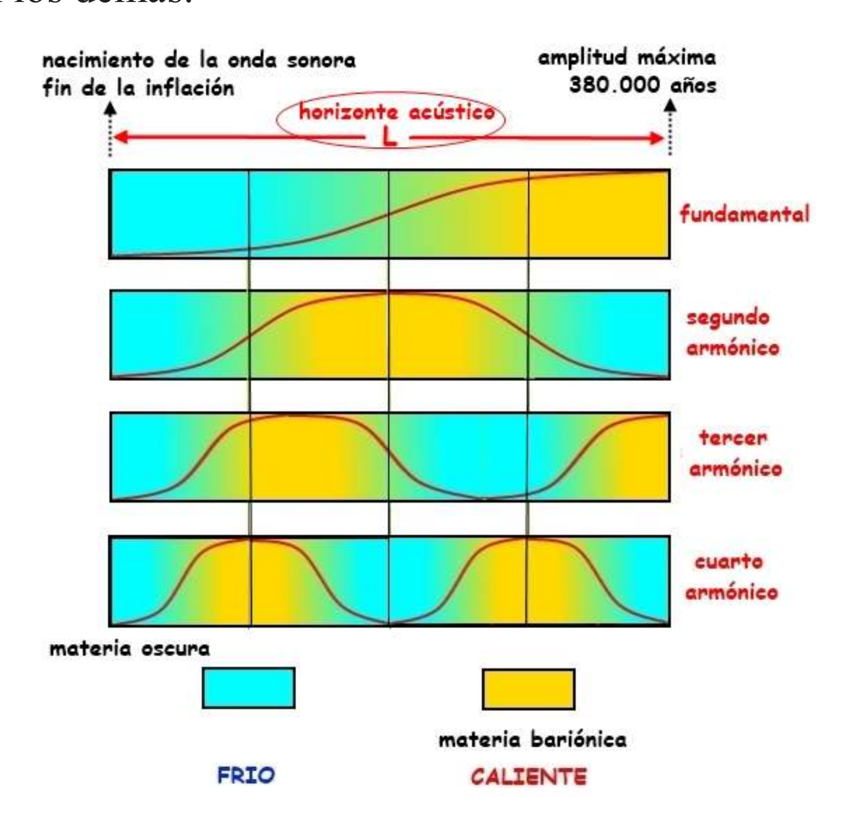


Esquema teórico de la realidad física que hemos podido captar como la foto de la radiación de fondo de microondas. Se explica en el texto (Imagen: Bárbara Alucino, a partir de Matthew Hedman, IyC diciembre 2005, fair use)

A la izquierda de la imagen anterior, una foto plana de la "esfera" del universo, en cuyo centro nos encontramos nosotros hoy como observadores. La circunferencia blanca es nuestro horizonte de visión del fondo de microondas: de allí salieron los fotones que nos llegan ahora a nosotros. Unos proceden de las zonas rojas de un plasma primordial más caliente y otros, de un plasma más frío. Todo ello dibuja un patrón de anisotropías que podemos ver enfocando nuestro zoom a diferentes escalas, con el resultado que vemos a la derecha. Éste es el origen del patrón de colores de la foto de la radiación de fondo. A la vista de esta maravilla, vamos a ver de qué forma podemos extraer la información que lleva en su mosaico. Recordemos lo que dijimos en el capítulo anterior acerca de los armónicos de la onda sonora.

Lo vemos en el esquema que sigue. El fundamental marcaba la máxima amplitud posible en el perfil de la onda sonora. Lo que es lo mismo que, como ya dijimos, la mayor diferencia de temperaturas entre zonas del Universo. El segundo armónico presentaba una nula diferencia de temperatura entre sus extremos, aunque sí inducía un pozo de materia bariónica en la zona intermedia. Al acoplarse ambos

armónicos en la frontera de la burbuja de sonido, la alta masa bariónica -temperatura- que allí fija el primero es modulada a la baja por el segundo. Un tercer armónico reforzaría la temperatura en la frontera de la burbuja ya que fomenta allí la concentración de masas. Y así con los demás.



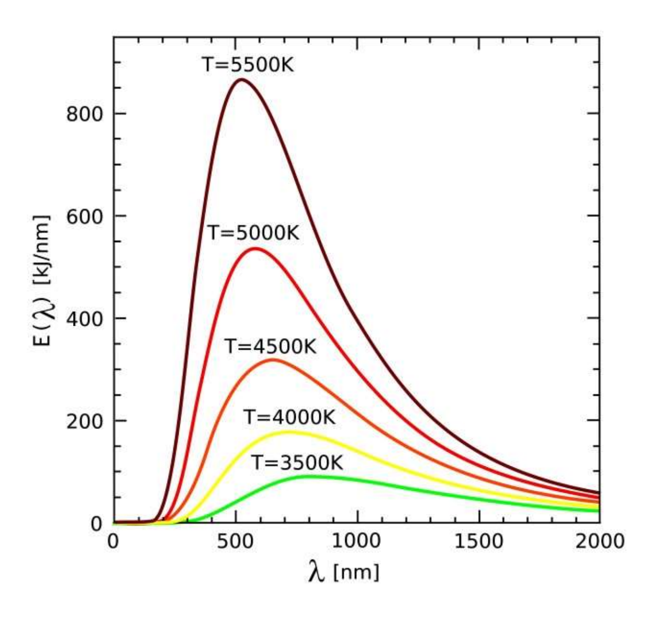
Repetimos el esquema ya visto en el capítulo anterior. Hago énfasis en que el hecho real que condiciona todo es la acumulación o no de la materia bariónica acompañada por la radiación. La temperatura es una consecuencia que acompaña a lo anterior, muy útil para nuestros análisis.

En el momento de la recombinación, cuando se "congelaron" las ondas de sonido, el armónico fundamental se había extendido una distancia igual a la que recorre el sonido durante los 380.000 años de existencia de la onda, unos 440 mil años luz. Esta distancia es conocida como **horizonte acústico**. A día de hoy, en que el Cosmos se ha "estirado" desde entonces en un factor de 1.100, este horizonte acústico ha crecido hasta un valor próximo a los 478 millones años-luz.

Antes de pasar a analizar qué es lo que nos dice la foto de la radiación de fondo haré hincapié en unas últimas ideas que nos permitan

apreciar la sensibilidad de estos fenómenos físicos a las diversas circunstancias del escenario. El tamaño del horizonte acústico tiene que depender del potencial del pozo gravitatorio inicial, de la energía de la radiación que impulsa el inicio de la onda de sonido y de la velocidad con la que se desplaza por el medio.[14] Las tres cosas dependen de la composición de la masa, bariónica y oscura, y su relación con la densidad de la radiación. El tamaño del horizonte acústico tal como lo observamos a día de hoy depende también del ritmo de expansión del Universo -constante de Hubble- y de su curvatura. Ambos dependen también de la cantidad de materia y energía total existente. Todo este cúmulo de diferentes circunstancias son las que explican en la foto del fondo de microondas las particularidades escondidas en su apariencia grumosa. Y lo que es más fantástico… es la información que lleva encriptada y que podemos intentar descifrar.

Con estas sencillas ideas vamos ahora a la tarea para despiezar la foto del fondo de microondas y ver su particular espectro de ondas sonoras. Vamos a hacer algo parecido a cuando se analiza por frecuencias un sistema cerrado para dibujar un perfil de la abundancia de cada una de ellas, como hacemos con el espectro de radiación de un cuerpo negro o con el espectro de la luz que nos llega del Sol.



Espectro de emisión de un cuerpo negro que también podríamos dibujar como la curva frecuencia-temperatura máxima (Imagen de la red, fair use)

Pero en nuestro caso lo vamos a hacer sobre la imagen de la esfera celeste del fondo de microondas -la foto de más arriba, segunda de este capítulo-. Como podéis imaginar el tema da mucho de sí, lo que aconseja desarrollarlo en un siguiente capítulo. Lo haré de forma somera, aunque espero que suficiente para ser entendido.

NOTAS DEL CAPÍTULO 17:

1. Y no se trata de la obra inconclusa del compositor estadounidense Charles Ives.

2. A este matrimonio se le llama un magnífico átomo de hidrógeno.

3. Según el viejo Planck eso iba de que la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, según su conocida ecuación $E=h\lambda$

4. Ya hablamos de ellas en el capítulo 15 que encabezamos como "*La sinfonía del Universo I*".

5. No en vano es desde allí de donde salen los fotones producto de sus fusiones nucleares que, tras cientos de miles de años de dispersiones por el interior de nuestra estrella, consiguen finalmente liberarse para llegar a nuestros ojos y dibujarnos un sol.

6. Se tratan de tres sondas espaciales portadoras de telescopios. COBE, 1989, fue el primer satélite construido especialmente para estudios de cosmología y estuvo especialmente dedicado al explorar el fondo cósmico. WMAP, 2001, tuvo como misión el estudiar el cielo y medir las diferencias de temperatura que se observan en la radiación de fondo de microondas. Por último, Planck, 2009, está diseñado para detectar las anisotropías en el fondo cósmico de microondas.

7. Ya veremos en un capítulo posterior que eso se produjo en un momento conocido como la **reionización**.

8. Aunque la manumisión de los neutrinos fue anterior a la de los fotones, al tener los primeros masa -son menos veloces- y los segundos no, se cree (ver el enlace propuesto más abajo) que el fondo de aquellos neutrinos que provengan de una determinada región del espacio está más alejado de nosotros que el fondo de fotones que proviene de la misma región. Curioso, porque los

neutrinos “echaron a correr” antes. Es una pista para buscar dónde puedan estar ahora los esquivos neutrinos primigenios.

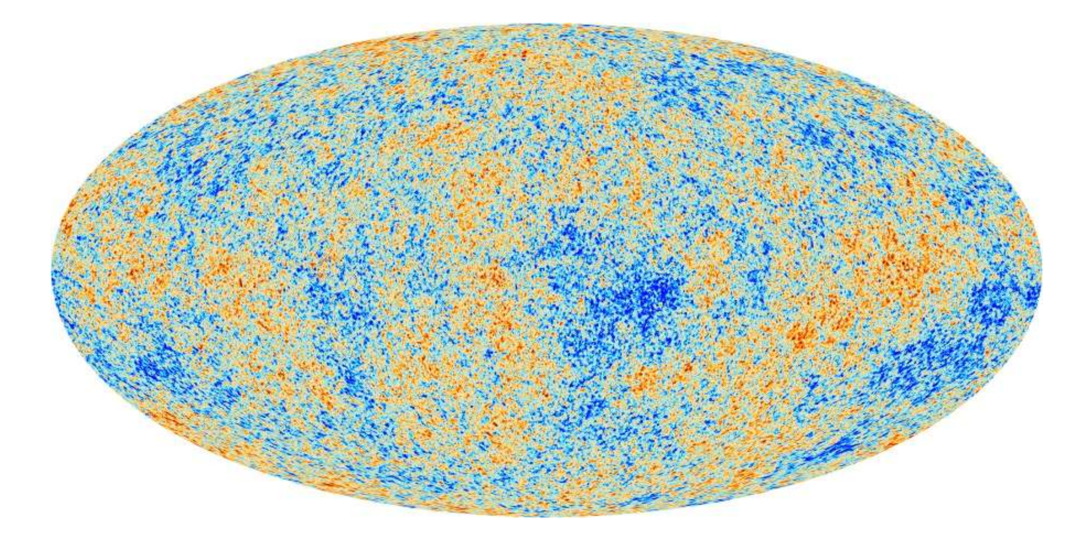
[https://arxiv.org/pdf/0907.2887v1.pdf]

9. 1.100 veces desde entonces.
10. Estos fotones son los elementos del Cosmos más alejados en el tiempo que podemos observar, son realmente el telón de fondo del Universo observable por nosotros.
11. Como dice Wikipedia, la proyección de Mollweide es una proyección cartográfica equitativa y pseudocilíndrica, ¡toma ya!, usada generalmente para mapas de la Tierra. El ecuador tiene el doble de longitud que el eje corto. El meridiano central es recto mientras que los meridianos a 90° son arcos circulares. Los paralelos son rectos pero desigualmente espaciados. La escala es casi verdadera sólo a lo largo de los paralelos estándar de 40:44N y 40:44S, por lo que tiene una mayor representación por la zona ecuatorial.
12. Las microondas tienen una longitud de onda en el rango de 1 metro a 10 milímetros, mientras que el visible se mueve en un entorno de los 10^{-7} metros.
13. En el enlace propuesto a Wikipedia os podéis hacer una buena idea de la aventura por la que se llevaron el premio Nobel de física de 1978, aunque para mí que les allanaron el camino los investigadores de la Universidad de Princenton, los cuales, tras hacer la mayor parte del trabajo, se quedaron compuestos y sin novia.
14. Habrá que repasar los dos capítulos anteriores.

18: Lo que nos enseña la radiación de fondo I

más teoría

En el capítulo anterior asistimos a un gran momento del Universo: **la recombinación**. El Universo parió a los primeros átomos y la energía quedó libre de la materia, o viceversa, lo que permitió el inicio de los procesos de la definitiva compactación gravitatoria que ha dibujado las estructuras actuales del Cosmos. Ahora, en este capítulo, continuamos con un objetivo: vamos a intentar destripar los misterios velados en la foto de la radiación de fondo de microondas. Lo que era quedó dicho en el último capítulo. Para nuestro nuevo propósito contamos con el análisis de su espectro de anisotropías -su falta de homogeneidad espacial-, que iremos deshojando al igual que podemos hacerlo con el de frecuencias de las emisiones de un cuerpo negro.



Esta imagen es el desarrollo en 2D de la superficie esférica más lejana,desde nos viene la radiación de fondo de microondas. Imaginémonos a nosotros como observadores situados en el centro de esa esfera desde donde lanzamos conos visuales que atrapan pequeñas áreas circulares de esta superficie. Es el comienzo de lo que se explica en el texto (Imagen: European Space Agency, ESA, non-commercial use)

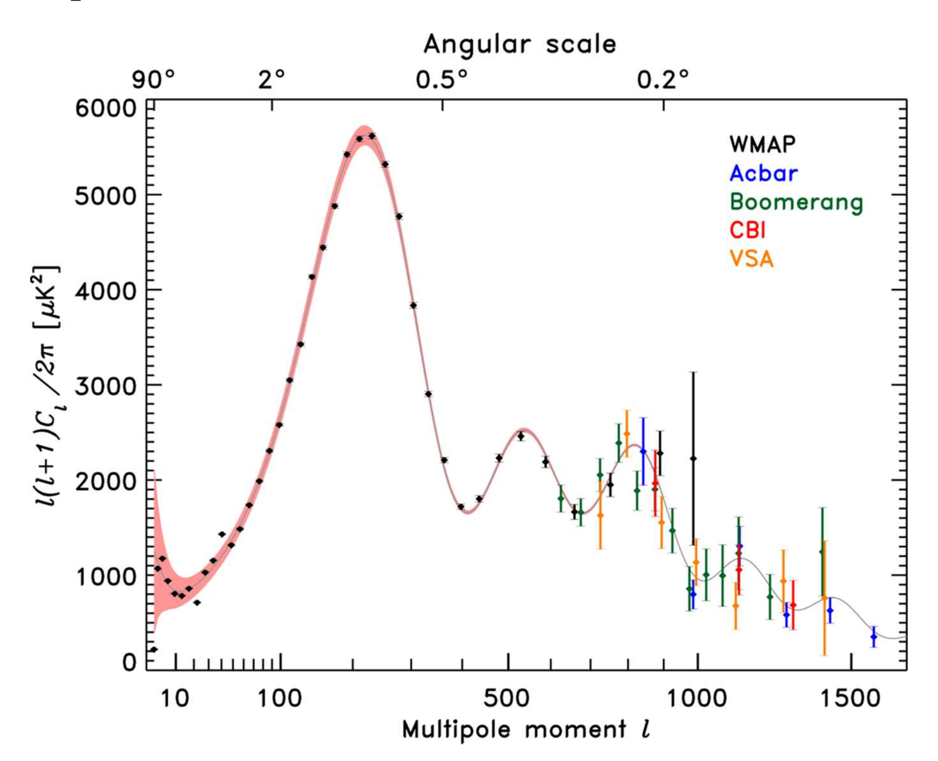
Esas anisotropías llevan encriptadas en su apariencia grumosa: [1] la información de quiénes la hicieron como son, es decir, la composición de la masa -bariónica y oscura- y su relación con la densidad de la radiación; y [2] la información de lo que hicieron, el ritmo de expansión del Universo -constante de Hubble- y de su curvatura, que dependen de la cantidad de materia y energía total existente. Podéis imaginar que la realidad de su estudio es harto compleja, pero conceptualmente, y de forma simplificada, vamos a intentar explicar el proceso.

Tomamos nuestro campo de trabajo, que es la fotografía del fondo de microondas, por ejemplo la de la página anterior que nos ha proporcionado el telescopio del satélite Planck.

La vamos parcelando en áreas que nosotros los observadores vemos desde fuera cubiertas por un ángulo θ, y que podemos imaginar como pequeños círculos. Medimos en cada una de estas áreas la ΔT, la mayor diferencia de temperaturas entre los puntos de su interior. A continuación determinamos para cada θ un valor promedio de ΔT, por ejemplo para zonas de un ángulo de 1º la ΔT promedio es de 0,0075K, con lo que obtendremos una serie de [ΔT, θ] que luego se transcribe a una imagen. Aunque realmente no se usa θ, sino otro parámetro equivalente: **el momento multipolar l**, que aproximadamente se correlaciona con el ángulo según θ~180º/l. Lo que hemos hecho realmente con esta discriminación angular es algo así como si al ir disminuyendo el ángulo de observación hubiéramos ido añadiendo filtros más finos que resaltan las anisotropías ocultas para los filtros anteriores de mayor ángulo, menos finos. Es como realizar un viaje desde las zonas más profundas en la edad del Universo hacia las más actuales. El resultado de este trabajo es la curiosa curva de la página siguiente.

Una curva con una serie de máximos que, aunque parezca sorprendente, nos va a dar una información fundamental del Universo, corroborando lo que ya sabíamos por otras experiencias y observaciones. El primer máximo es un pico relacionado con las zonas de máxima compresión de la materia bariónica, que ya sabemos que es igual a decir "de temperatura máxima".[1] El segundo, de menor altura y en un momento multipolar mayor, indica que al mirar

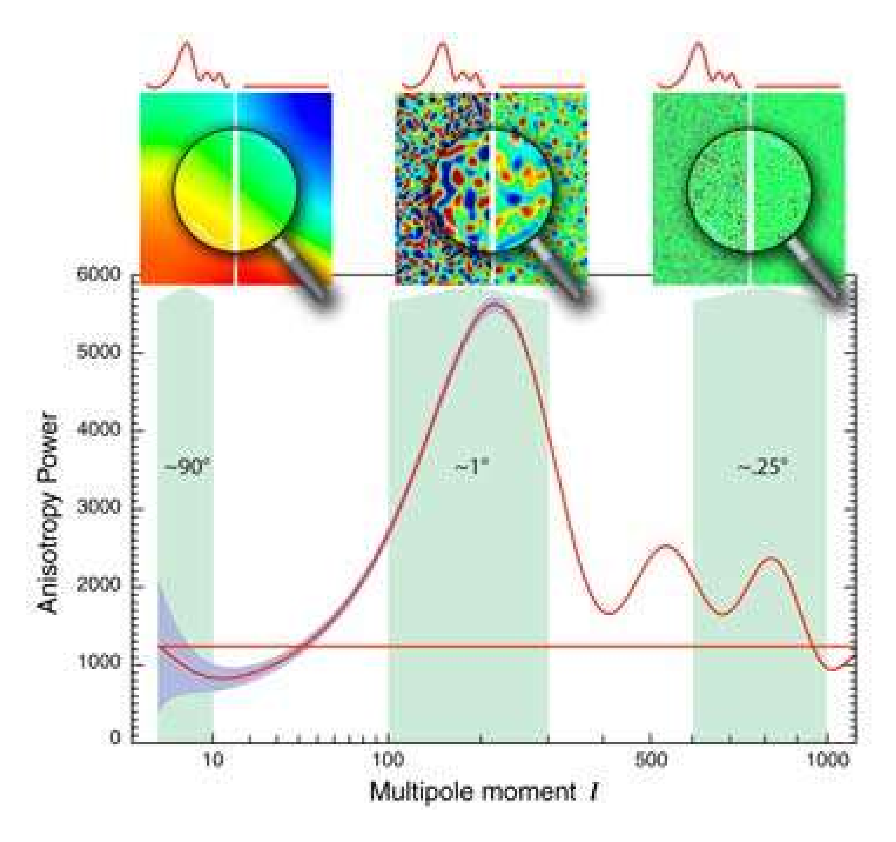
con otro zoom podemos observar cómo se ha añadido un efecto de rarefacción que atempera la temperatura. El tercero atempera la tendencia al enfriamiento, lo que indica que a escalas aún menores se ha añadido al segundo pico un nuevo impulso de compresión, por lo que indica un nuevo refuerzo a la temperatura. Suena tremendamente a lo que decíamos en los capítulos anteriores acerca de los tres armónicos primeros de la onda de sonido. Y realmente es así.



El espectro de potencia de las anisotropías de la temperatura del fondo de radiación de microondas en función de la escala angular, según datos aportados por diversos experimentos, datos que se superponen con bastante precisión sobre la línea continua de color rosa que corresponde a la curva teórica (Wikimedia, dominio público)

Lo cual parece también decir que la curva de anisotropías lleva en sus patrones cierta información del horizonte acústico y su desarrollo. Lo que, como ya hemos comentado, nos conduce a la información sobre el tipo de materia y radiación existente en el Universo, sus densidades y la curvatura del mismo. Todo un regalo. Hay que recalcar que la curva dibujada utilizando datos experimentales se ajusta perfectamente a la curva teórica que se obtiene por "simple" cálculo, aplicando los criterios del Modelo Estándar y el concepto ya

explicado en otros capítulos de las ondas sonoras del plasma, lo cual nos hace sentir bastante seguros mientras manejamos nuestras hipótesis y teorías. Vamos a analizar con un poco más de detalle la información oculta en este espectro.

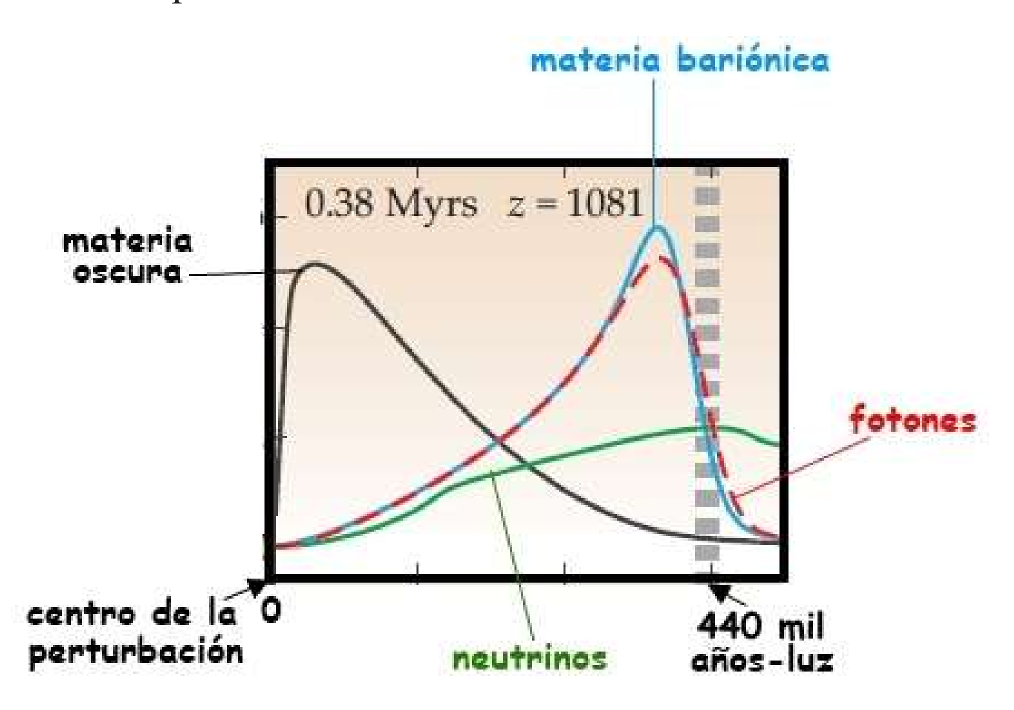


Explicación gráfica de lo que se "ve" según distintos momentos multipolares (Imagen: NASA, libre uso no comercial)

En la imagen anterior, la línea roja horizontal es la teórica que correspondería al caso de que no hubiera ninguna anisotropía, es decir, en el caso de que nuestro universo fuera perfectamente homogéneo. La izquierda de la curva ondulante corresponde a lo que se observa bajo ángulos muy grandes, es decir, con poquísima definición en la imagen. Estamos viendo el Universo casi en su conjunto y sin resolución para observar sus detalles. A estas escalas, la circunstancia que domina el patrón de temperaturas en la imagen de microondas es la fuerza de la gravedad, que creemos que en su mayoría estaba generada por la materia oscura. En estas escalas, pues, las zonas con temperatura por debajo de la media corresponden a aquellas en las que los fotones tenían que salir de las regiones con mayor acumulación de masa, lo que les hizo perder un poco de energía en el proceso al intentar escapar del intenso pozo gravitatorio.

Por el contrario, las zonas más calientes corresponderían a menores acumulaciones de materia. Cuando promediemos estos patrones correspondientes a grandes escalas buscando nuestro ΔT, obtendremos en cada una de ellas una imagen burda y casi a ojo de pájaro, mostrando unos valores equivalentes al promedio del conjunto, que es del orden de 10^{-5}K. Por ello no nos extraña el que en el rango de momentos multipolares pequeños la curva presente valores bajos para cada punto, próximos a los de la recta teórica.

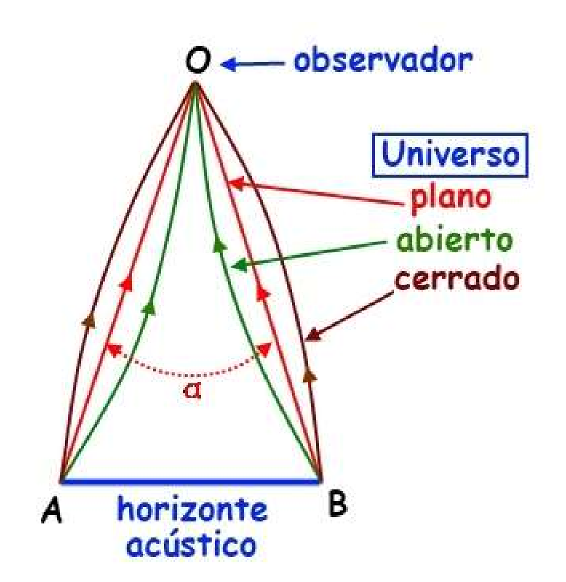
Vayamos más hacia la derecha, en donde se empiezan a apreciar los detalles, los patrones que dejaron las ondas de sonido. Como podemos ver en la figura siguiente, que dibuja la posible distribución de materia causada por una onda de sonido fundamental en el momento de la recombinación, la densidad de la radiación -fotones- no se concentra en donde hay una gran densidad de materia oscura, sino en el frente de ola de materia bariónica. Por esta razón los fotones más calientes se encontrarán en estas últimas zonas, las de compresión, y los más fríos en las zonas de materia oscura. Esta casuística es la que vamos a analizar.



Distribución de la materia y la energía de una fluctuación cuántica primordial en el momento de la recombinación (Imagen: a partir de Daniel J. Eisenstein, Physics today, abril 2008, fair use)

Fijémonos ahora en el primer pico de la anterior curva de anisotropías. Es el máximo de la curva, y se da en el entorno del momento multipolar de **l=200**, equivalente a zonas abarcadas por una amplitud angular de aproximadamente 1º. Como este pico es el mayor de los máximos ya sabemos que tiene que tener alguna relación con aquellas zonas en donde se dieron las diferencias de temperatura más extremas. Es decir, y recalcamos, estamos viendo desde nuestro puesto de observadores en la Tierra a los fotones de la recombinación que provienen de puntos entre los que se dio el mayor contraste térmico, cuya separación física está cubierta por un ángulo de 1º. Sabemos por la teoría que hemos explicado en el capítulo 16 que este intervalo particular es la consecuencia de la "congelación" del armónico fundamental de la onda de sonido cuando el Universo tenía 380.000 años, y que la distancia, el "tubo de la flauta", es el horizonte acústico en el momento de la recombinación. Los cálculos más precisos disponibles nos dicen que tiene una amplitud de 490 millones de años luz a día de hoy, después de haber crecido 1.100 veces. Y eso ¿qué nos dice?

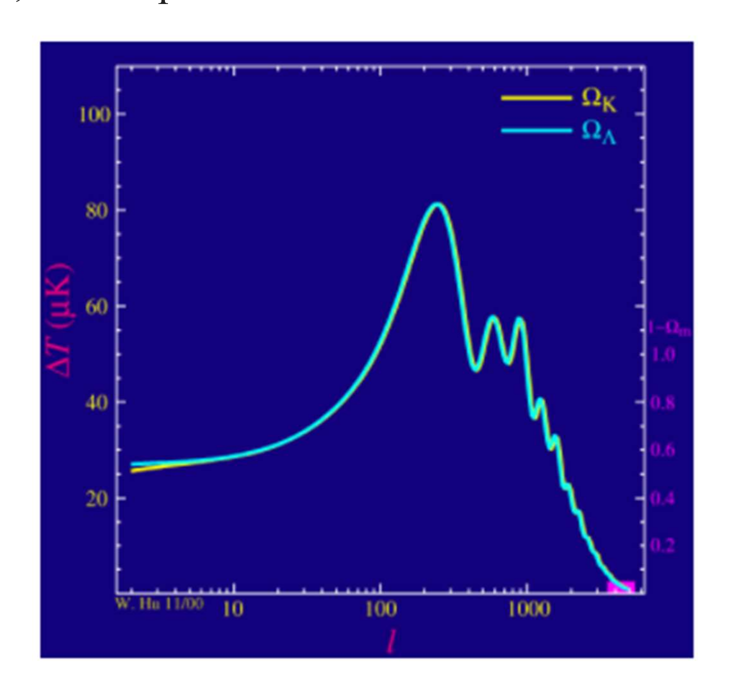
Pues nos sirve, entre otras muchas cosas, de vara de medida para investigar sobre la curvatura del Universo. Por todo lo que observamos parece ser que sigue una geometría euclídea plana.

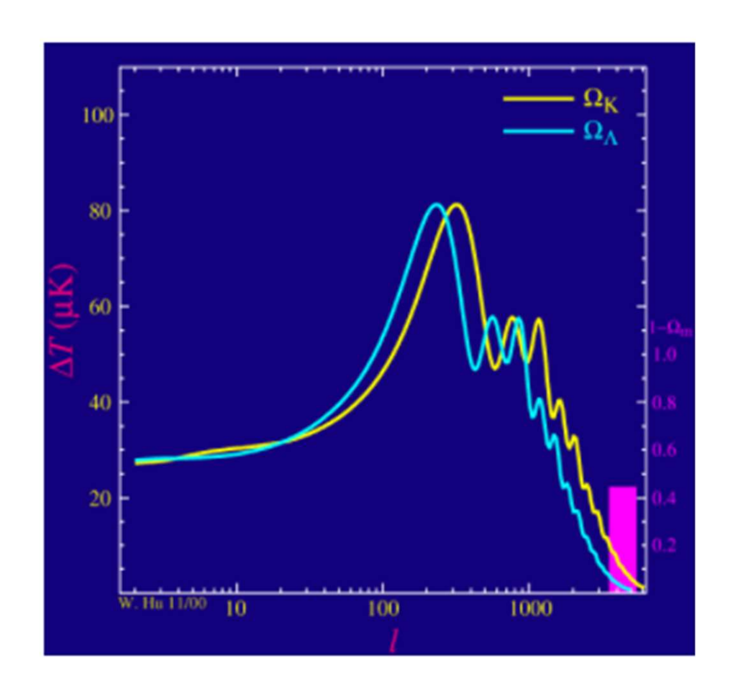


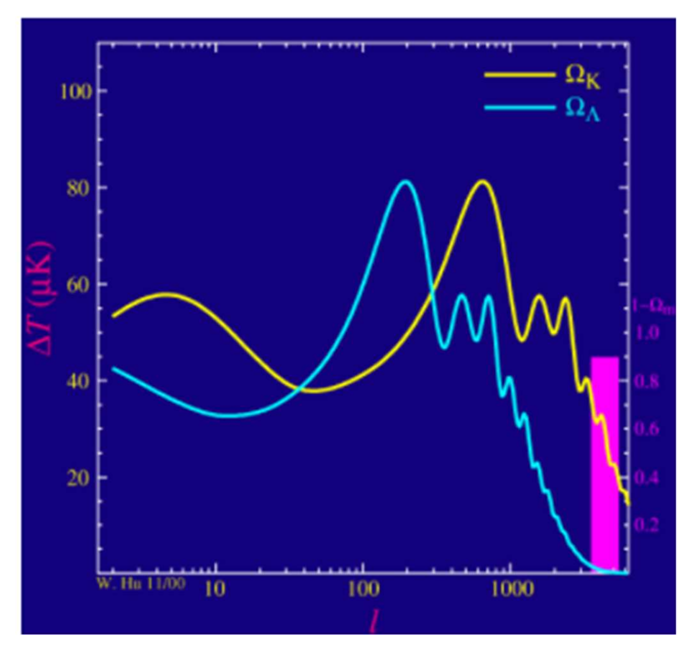
En la figura anterior intentamos visualizar lo que sucede según el tipo de curvatura del Universo, que puede adoptar tres tipologías: la plana, la positiva -cerrado- y la negativa -abierto-. Todo depende de la cantidad de materia que se encuentra en el Universo. Teóricamente

se ha definido una densidad de materia/energía que llamamos "crítica", que corresponde a la que hace que las ecuaciones que rigen la dinámica del universo -las de la relatividad que correlacionan forma y energía- nos den para éste una geometría -la métrica que lo rige-[2] plana. En un universo plano los fotones que hubieran salido desde los extremos del horizonte acústico describirían una trayectoria lineal hasta llegar a nosotros, los observadores, trayectorias que formarían un ángulo que vamos a llamar α. Si el universo fuera abierto, el ángulo de arribada sería menor que α y si fuera cerrado sería mayor.

Los *estudios teóricos* que se han hecho para definir mediante cálculo el espectro de frecuencias de la radiación de fondo de microondas determinan que, para el caso de una distribución de materia/energía propia de un universo plano, se deberá de dar un pico en campos angulares de aproximadamente 1º, un momento multipolar de 200. Al disminuir la densidad de materia/energía, cosa que hace que el universo se abra,[3] se observó en los estudios que este pico se movía hacia multipolos mayores -definición angular menor-, lo cual es lógico, porque en este caso los fotones, como habíamos comentado en el párrafo anterior, cierran sus trayectorias.[4] Lo podemos ver en la serie de imágenes siguiente con la que se representan los resultados de los cálculos teóricos, realizados a partir de nuestros modelos cosmológicos, en los que se ha hecho variar la cantidad de materia.







Evolución del primer pico dependiendo de la cantidad de materia que se considere en el Universo, lo que define su geometría (ver explicación en el texto). (Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, fair use)

Hay dos curvas teóricas: la azul, que tiene en cuenta además de a la materia a una energía intrínseca -puede ser pensada como la energía oscura, aunque ahora estamos en un nivel de cálculo teórico- y la amarilla, que sólo tiene en cuenta a la materia. La barra rosa de la derecha indica el parámetro equivalente a "densidad crítica menos densidad de materia" (de lo que sea la densidad crítica hablaremos

unos párrafos más abajo).[5] A mayor barra rosa, menor es la participación de la materia -bariónica y oscura- en la densidad crítica, y por tanto más nos alejamos de un universo plano hacia uno abierto. Si nos fijamos en la curva amarilla vemos que al disminuir la materia -cuando sube la barra rosa- el primer pico (en general todos los picos) se desplazan desde una posición l=200 hacia multipolos mayores, que es lo que podíamos esperar. Vemos que en el proceso de la barra rosa descendiendo -es decir, el universo está en camino hacia la geometría plana- el primer pico se aproxima y llega a un multipolo 200, lo que equivale a una definición angular de 1º. También vemos que en la curva azul, en la que se tiene en cuenta la energía oscura, el desplazamiento es casi inexistente, lo cual nos indica que debe haber mucha de esta energía intrínseca, ya que su influencia anula prácticamente cualquier variación de la materia.

Pues bien: justo todo eso es lo que hemos visto luego en la realidad al estudiar los datos obtenidos por nuestros instrumentos. Que nos permite decir que de las tres posibilidades para el triángulo de la figura de tres páginas más arriba con base el horizonte acústico nos tenemos que quedar con la que corresponde para universos planos: tenemos los tres lados medidos -la base es el horizonte acústico y los otros dos lados la distancia al borde del Universo observable-, también hemos medido el ángulo α y es igual a 1º. A partir de esos datos, los cosmólogos han podido medir con gran precisión la suma de los tres ángulos, y es justamente 180º. Curioso, ¿verdad? Se trata, por tanto, de una geometría puramente euclidiana, lo que nos dice claramente que nos encontramos con un Universo que la cumple, luego geométricamente se comporta como si fuera plano. Tanta maravilla esconde un pequeño “pero” que no invalida la conclusión, porque la verdad es que no conocemos con precisión absoluta los parámetros que conforman este triángulo. Con ello quiero decir *la velocidad del sonido* en el plasma inicial -que condiciona la longitud del horizonte acústico- y la *constante de expansión* del universo -que condiciona los otros dos lados del triángulo-. De todas formas, los expertos nos aseguran que la confianza con que lo decimos es del 95%. Yo apostaría mi sombrero en favor del Universo plano.

Evidentemente, un universo plano no tiene sólo dos dimensiones espaciales. Al menos nuestra experiencia nos dice que podemos apuntarle tres direcciones ortogonales: arriba-abajo, derecha-izquierda y delante-detrás, lo que no nos impide imaginar desde dentro la idea abstracta de planitud. Un ser que nos contemplara desde la dimensión n+1, siendo n el número de dimensiones de nuestro Universo, sería capaz de explicarnos con soltura la evidencia para él de que nuestro Universo es "plano". Pero ¿por qué es tan importante que sea plano?

Tiene que ver con la cantidad de materia-energía que contiene. Si hubiera mucha la gravedad el universo colapsaría en forma de una esfera cerrada cada vez más curvada y pequeña. Si hubiera poca, la expansión seguiría acelerada hasta "rasgar" su tejido, cada vez más abierto y con más curvatura negativa. Cualquier desviación positiva o negativa con respecto a un punto de equilibrio, aunque hubiera sido mínima, se hubiera realimentado exponencialmente para caer en el mundo "colapsado" o en el mundo "rasgado". Pero vemos que el universo no parece comportarse ni de una ni de otra manera, lo que quiere decir que tiene que tener una densidad adecuada para que suceda lo que observamos, que no habrá variado mucho desde el inicio. Y ello implica que su densidad de materia y energía, al ser plano, deba coincidir con la crítica: $0{,}9\times10^{-29}$ gr/cm^3. Normalmente se habla no de valores absolutos, sino del porcentaje de participación de la densidad de cada uno de los componentes en la densidad crítica total. Estas participaciones se designan con la letra Ω y por tanto, si en el Universo coexisten tres tipos de materia o energía, como así creemos que es, se deberá cumplir:

(normalizado a la propia densidad crítica)

$$\boldsymbol{\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 = 1} \quad = (0{,}9\times10^{-29}/0{,}9\times10^{-29})$$

Por ahora sólo hemos hablado de materia oscura y de materia bariónica, por lo que deberíamos decir que $\boldsymbol{\Omega_{materia} = 1}$. Sin embargo, sabemos por otro tipo de observaciones que en el Universo hay mucha menos materia bariónica que materia oscura y que entre ambas aún no suman lo bastante como para justificar la unidad. Luego debe haber otro componente en el Universo que complemente a las dos

materias, circunstancia que también hemos podido deducir del estudio de la curva de las anisotropías de la radiación de fondo de microondas: hay una energía intrínseca al tejido espacio-temporal con muchísimo peso en las cosas que suceden.

Llegados aquí, con las neuronas calientes de tanta materia y radiación, nos va a convenir mirar solamente a los posos que se hayan podido decantar, si es que hay alguno. Voy a intentar resumir de todo el alegato anterior lo que básicamente **nos dice el primer pico** del espectro de potencia de las anisotropías de la temperatura del fondo de microondas: **[1]** Nuestro universo es plano, **[2]** con una determinada relación entre materia oscura y el tándem bariónica/radiación, que **[3]** hay bastante materia oscura… aunque **[4]**también hay otro tipo de participante. Dicho esto, en el capítulo siguiente continuaremos con el análisis de los armónicos encontrados en las anisotropías.

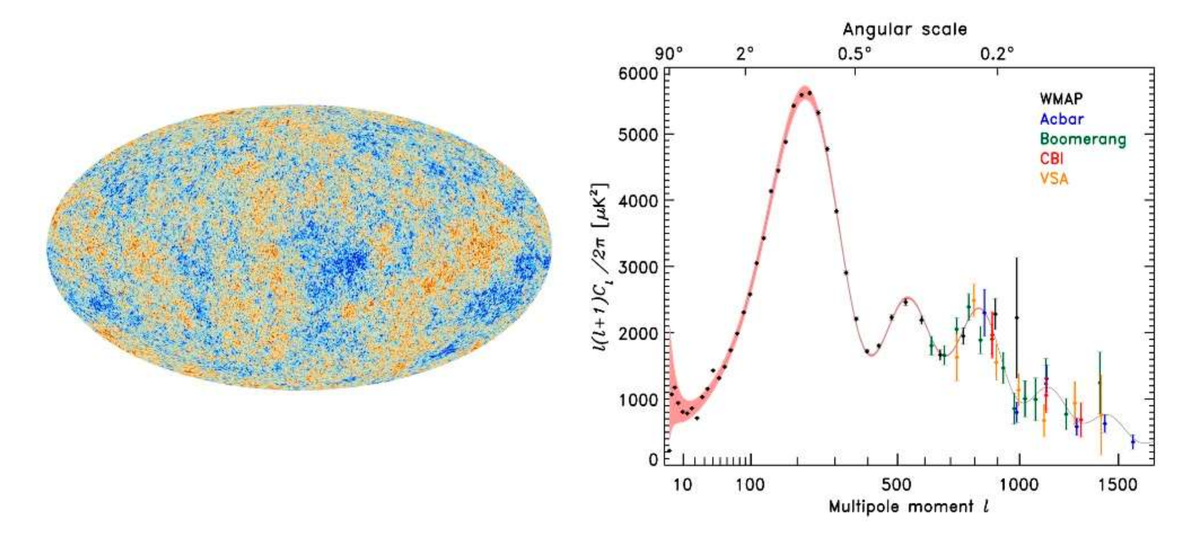
NOTAS DEL CAPÍTULO 18:

1. Podéis repasar este aserto y todo el trasfondo de lo que viene en algunos capítulos anteriores. En concreto los número 15, 16 y 17.
2. La métrica es lo que nos permite calcular distancias en un espacio, y es el punto clave sobre su geometría, la que nos dirá cómo son en este espacio las distancias, los volúmenes o los ángulos. Para la relatividad especial tenemos que la métrica, que representaremos por ds^2, toma la siguiente forma $\mathbf{ds^2=-c^2dt^2+dx^2+dy^2+dz^2}$, que se transforma en la euclidiana si el universo es plano. Recordemos que en una geometría euclídea la suma de los ángulos de un triángulo es de 180º. Sin embargo, en un universo cerrado la suma de los tres ángulos es mayor que 180º, y en uno abierto, menor.
3. La gravedad tira menos y le puede la energía interna que expansiona el tejido espacio-tiempo.
4. El ángulo α es menor, lo que quiere decir multipolos mayores.
5. Realmente las densidades se han normalizado al valor de densidad crítica igual a uno [**incidencia de los bariones + incidencia de la materia oscura + incidencia de la energía oscur = 1**].

19: Lo que nos enseña la radiación de fondo II

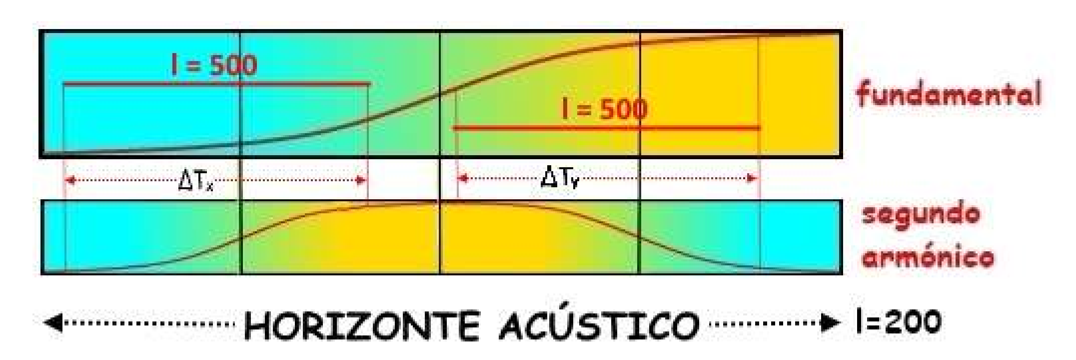
seguimos con la teoría

En el anterior capítulo habíamos comenzado a analizar el espectro de anisotropías de la radiación de fondo de microondas. Este cúmulo de palabras encadenadas no quiere decir más que estamos hablando de la foto de los primeros fotones que se emanciparon de la materia en los momentos iniciales, cuando nuestro personaje estaba cumpliendo más o menos su 380.000 cumpleaños. Nos habíamos extendido al hablar del primer pico de dicho espectro, que nos había dicho mucho sobre la curvatura del Universo y de la composición de la materia. También nos había puesto sobre la pista de algo que llamábamos *energía intrínseca* al tejido espacio-temporal, cosa que conocemos más comúnmente como *energía oscura*. Y deducíamos que debía de haber mucha. Para que no se nos olvide, repetimos aquí abajo la imagen de lo que es nuestro campo de estudio y, además, también volvemos con su carnet de identidad, que incorpora muchos rasgos de su personalidad.



A la izquierda, mapa de la radiación de fondo de microondas (Imagen: European Space Agency, ESA, non-commercial use) y a la derecha, su espectro de potencia de las anisotropías (Wikimedia, dominio público)

Tras haber analizado el primer pico, ahora vamos a continuar la investigación atendiendo al **segundo pico** que aparece en la fotografía de la recombinación cuando *bajamos a resoluciones más finas,* lo que quiere decir menor ángulo θ o momento multipolar l mayor. Es como si en el campo circular de 1º del primer pico empezáramos a ser más puntillosos y lo compartimentáramos en círculos de menos radio. Al aplicar la lupa en estos terrenos podemos detectar más pormenores, de forma que si elegimos un radio de medio grado comenzaremos a apreciar los detalles producidos por la influencia del segundo armónico de la onda de sonido que, recordemos, tenía una longitud de onda la mitad que la del armónico fundamental.[1] El resultado de este rastreo más minucioso nos hace ver que próximo a l=500, lo que equivale a un ángulo de 0,4º, encontramos otro máximo en la curva del espectro. En el capítulo anterior ya dijimos cómo se construye la curva[2] de forma que ahora ya sabemos que dentro del campo fijado por este ángulo de observación sobre el fondo del Universo vamos a encontrar un intervalo de temperaturas característico, menor al que detectamos en zonas abarcadas por ángulos mayores, y que es consecuencia de la superposición de influencias de los armónicos, tal como podemos intuir al ver la figura de más abajo. No nos debe sorprender, por tanto, que el segundo pico en las anisotropías aparezca donde aparece y que tenga una menor altura que el primero.

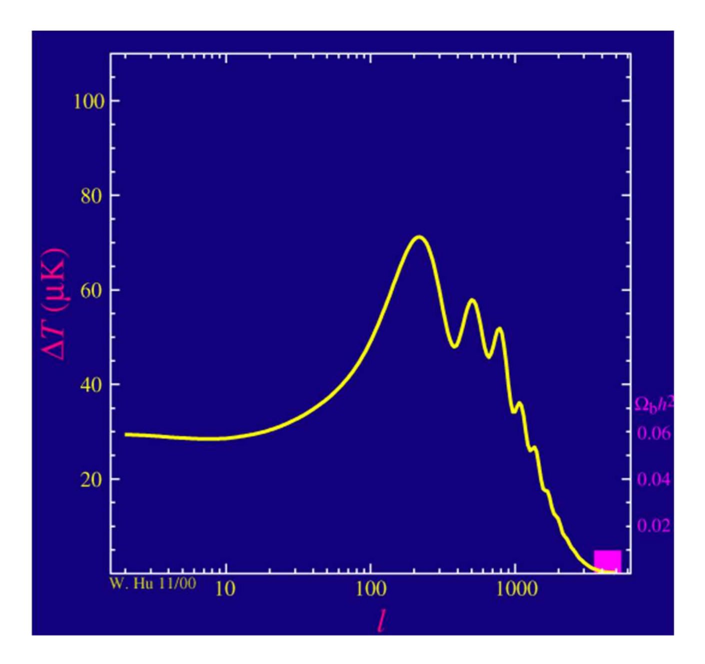


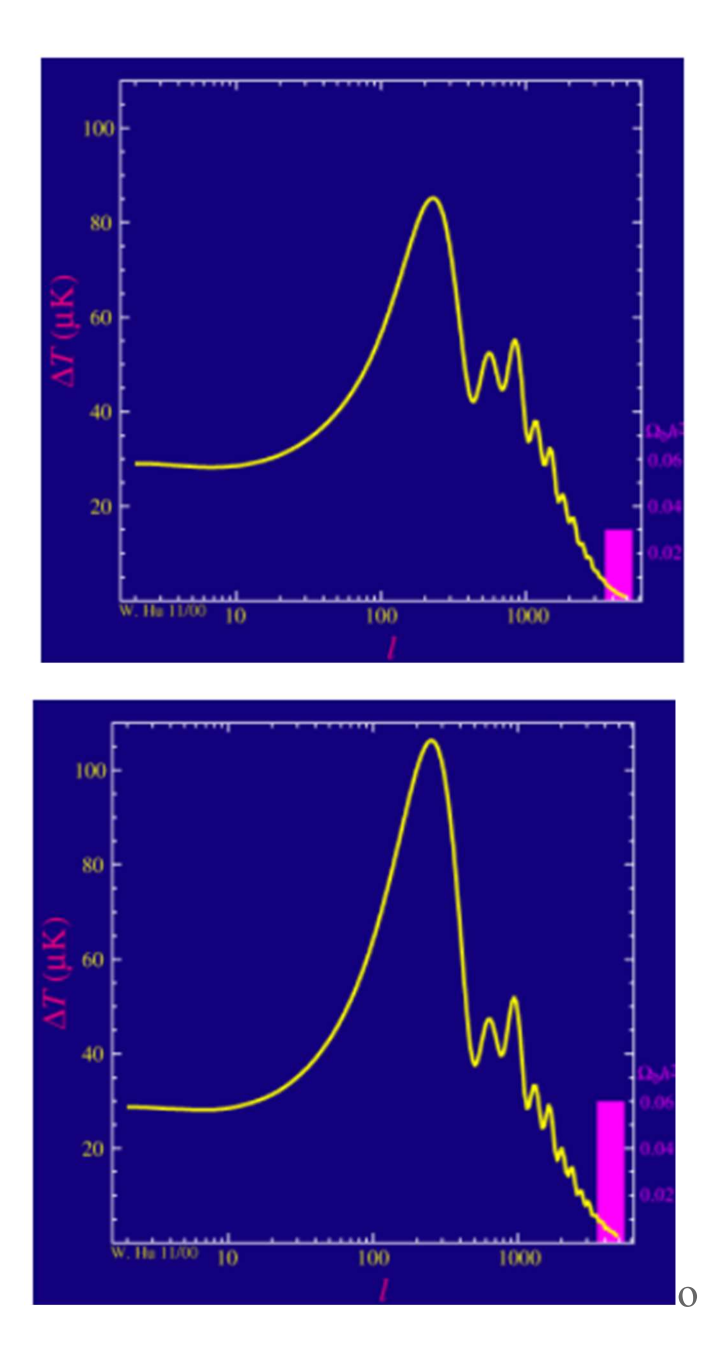
Las zonas en azul son las que acumulan menos materia bariónica/radiación -aunque más materia oscura- y, en consonancia, son más frías, mientras que las amarillas son las de más materia bariónica/radiación y, en consecuencia, las más calientes. Medimos en todos los campos l=500 su ΔTi y calculamos su promedio, dato que recogerá la curva de anisotropías.

Ahora vamos a intentar entender el mensaje oculto en este segundo pico. Para ello imaginemos que en el Universo, por arte de magia, se incrementa la densidad de la materia bariónica. Tenemos que pensar que si eso sucede el pozo gravitatorio inductor de la onda sonora sería mucho mayor, lo que haría que la compresión inicial fuera más potente antes de que la presión de la radiación comenzara a actuar distendiendo a la materia. Deberemos pensar también que al ser el plasma más denso, lo que induce una especie de rozamiento, esa distensión sería más pequeña. Es decir, que dentro de los patrones de la onda sonora los fenómenos de distensión serían penalizados con relación a los fenómenos de compresión gravitatoria: En general, los armónicos pares serían penalizados en su amplitud con relación a la de los armónicos impares.[3]

Todo ello nos tiene que hacer pensar que el primer armónico, compactador, se reforzaría, mientras que el segundo armónico, rarificador, se debilitaría con el incremento de materia bariónica. La consecuencia se debería observar en la curva de anisotropías de la radiación de fondo. De hecho los resultados de las simulaciones teóricas así lo manifiestan, como lo podemos ver en las tres imagenes que siguen.

Evolución de los picos al variar la materia bariónica (Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, fair use)





o

En las imágenes vemos cómo al aumentar la participación de la densidad de la materia bariónica Ω_b la diferencia de alturas entre el primero y segundo pico se incrementa, luego si analizamos la diferencia de altura entre picos pares e impares de la curva observacional que encabeza este capítulo, seremos capaces de deducir la cantidad y composición de materia en el Universo. El hecho de que la diferencia entre la altura del primer pico y la del segundo sea tan grande parece indicar la existencia de una cantidad muy apreciable de materia. Del análisis de esta diferencia de altura entre los dos primeros picos los cosmólogos han deducido que la masa bariónica y los fotones tenían la misma energía, lo que les ha

conducido a asegurar que la densidad bariónica explica hasta un 5% de la densidad crítica del Universo. Este dato es muy significativo, ya que a partir de su observación directa sólo somos capaces de contabilizar bariones que aportan un 2% a la densidad total. Lo cual quiere decir que hay un 60% de bariones perdidos en el Universo. Realmente no están *perdidos*, están ahí, pero no sabemos donde.[4] Y esto es lo que nos sugiere el segundo pico.

Ampliando el análisis con los datos que proporciona **el siguiente pico**, el cual ya incorpora la incidencia del tercer armónico de la onda sonora, los expertos llegan a la conclusión de que se necesita aún más masa para asegurar que los pozos gravitatorios sean lo suficientemente profundos como para explicar lo que se observa. De hecho, se ve en la curva resultado de las observaciones reales efectuadas por nuestros satélites cómo el tercer pico se aparta del patrón descendente que parecen dibujar los restantes picos, de forma que es casi igual que el segundo. Lo cual es una pista de que debe haber más materia de la que parece.[5] Esa mayor masa la proporcionaría la materia oscura, que tiene que ser cinco veces superior a la masa bariónica y, por tanto, nos justificaría así hasta un 25% de la densidad crítica.

Aún con todo, nos quedaría en el aire la energía oscura, con un peso porcentual en la densidad crítica de[6]

$$\Omega_{\Lambda(\text{energía oscura})} = 1 - \Omega_{\text{materia oscura}} - \Omega_{\text{materia bariónica}} =$$

$$= 1 - 0{,}25 - 0{,}05 = 70\%$$

Resumiendo lo dicho hasta ahora sobre la información que inferimos de la curva de anisotropías: El primer pico nos habla de la planitud del Universo y de la materia oscura; el segundo, de la existencia de materia bariónica que no vemos; mientras que del tercero deducimos la cantidad de materia oscura en el Cosmos.

Los restantes picos son muy sensibles a la relación entre la densidad de la materia oscura y la de la radiación. A partir del tercer pico del espectro, los otros van disminuyendo y diluyéndose. Se cree que eso es así dado que las amplitudes de onda de los correspondientes armónicos eran mucho más pequeñas que las distancias medias entre

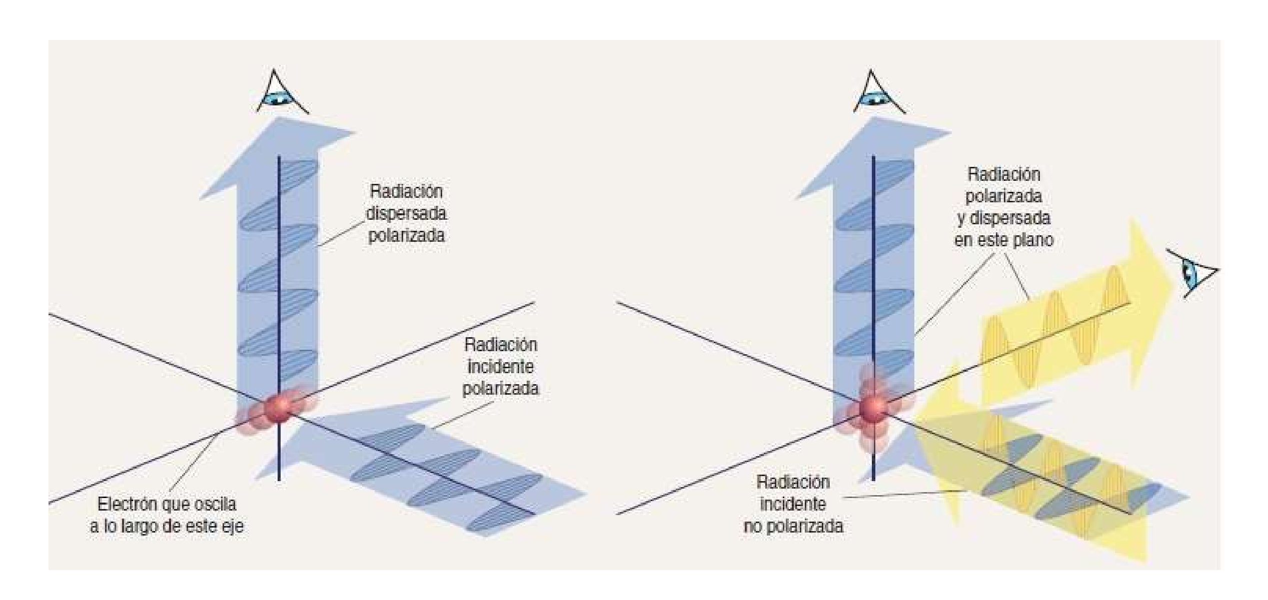
los bariones del plasma,[7] por lo que los armónicos menores de la onda sonora se tuvieron que disipar sin poder influir en las compactaciones de la materia y radiación.

¡No acaba aquí todo!, porque aún hay más lecciones que aprender de la foto inaugural. Estos fotones que nos llegan desde hace más de 13.400 años luz no sólo nos dicen los patrones de materia escritos en su distribución de energías, sino que nos aportan una información adicional escondida en sus **patrones de polarización**… ¡Pero bueno! ¿Es que los fotones del fondo de microondas están polarizados? Pues sí. Y vamos a ver por qué.

Así como el mapa de la radiación de fondo presenta una serie de anisotropías de brillo -temperatura-, también lo hace mostrando un patrón de polarización. Anisotropías de brillo y de polarización que fueron debidas a fenómenos diferentes. Ya sabemos el porqué de las primeras, por lo que nos quedaría por analizar las segundas, que también quedaron "congeladas" en el momento de la recombinación y que nos van a dar indicación de la velocidad del movimiento del plasma o de las ondas gravitatorias primordiales surgidas tras los últimos instantes de la inflación exponencial del Universo.

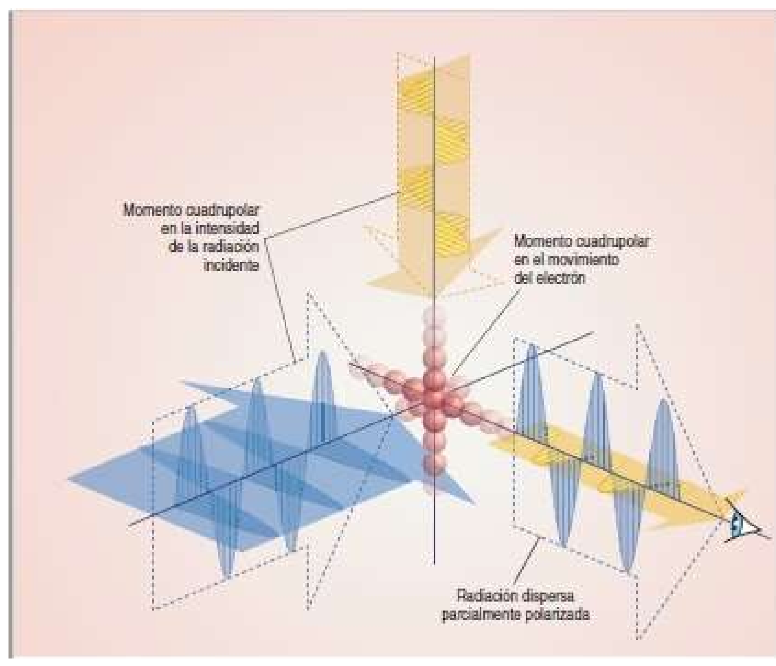
La polarización de la radiación en el plasma inicial fue debida a las interacciones con los electrones libres, dando lugar a dispersiones del tipo Thomson a bajas energías. Estas dispersiones consisten en lo siguiente:

La onda del fotón inicial lleva asociado un campo eléctrico sinusoidal, el cual hará que el electrón cargado negativamente oscile en el plano perpendicular a ese campo. Esta oscilación hace que el electrón emita energía en forma de otro fotón, que oscilará en un plano perpendicular al de como oscilaba el electrón. Lo cual quiere decir que el fotón emitido estará polarizado en el plano del campo eléctrico del fotón inicial. El fotón secundario siempre estará polarizado, sean cuales sean las condiciones de polarización del fotón incidente. Este proceso se puede comprender mejor viendo la imagen siguiente que representa el esquema general de polarización durante las interacciones Thomson.



(Imagen: Barbara Aulicino, I y C, diciembre 2005, fair use)

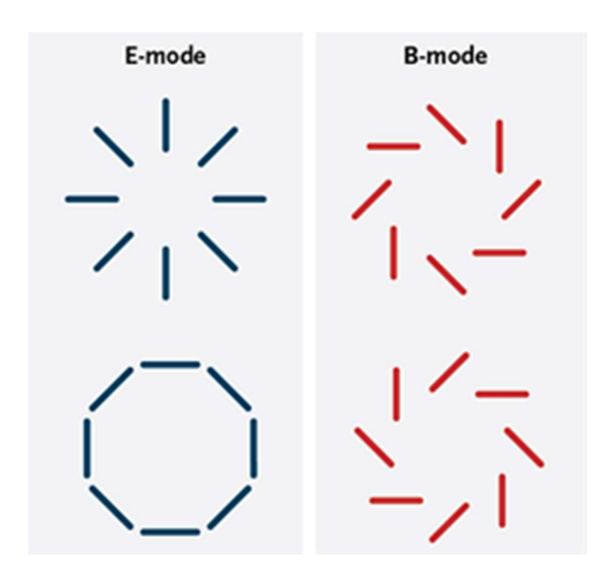
En el plasma primordial los electrones estaban bombardeados por fotones que les venían por cualquier lado. Si todos esos fotones hubieran sido de la misma energía, en las dispersiones Thomson el electrón se hubiera visto movido de igual forma en todas las direcciones y, como consecuencia de ello, los fotones dispersos tras la interacción Thomson no iban a estar polarizados: sus ondas iban a tener componentes en todas las direcciones.



Esquema particular de las interacciones Thomson en el plasma primordial (Imagen: Barbara Aulicino, I y C, diciembre 2005, fair use)

Pero lo anterior no sucedería en el caso de que el electrón se encontrara en una zona del plasma primordial en donde unos fotones fueran más fríos que otros: entonces el electrón *vibraría preferentemente* en el sentido fijado por los fotones calientes de mayor energía. Por consiguiente, en esas regiones del plasma los fotones dispersos quedaban polarizados.

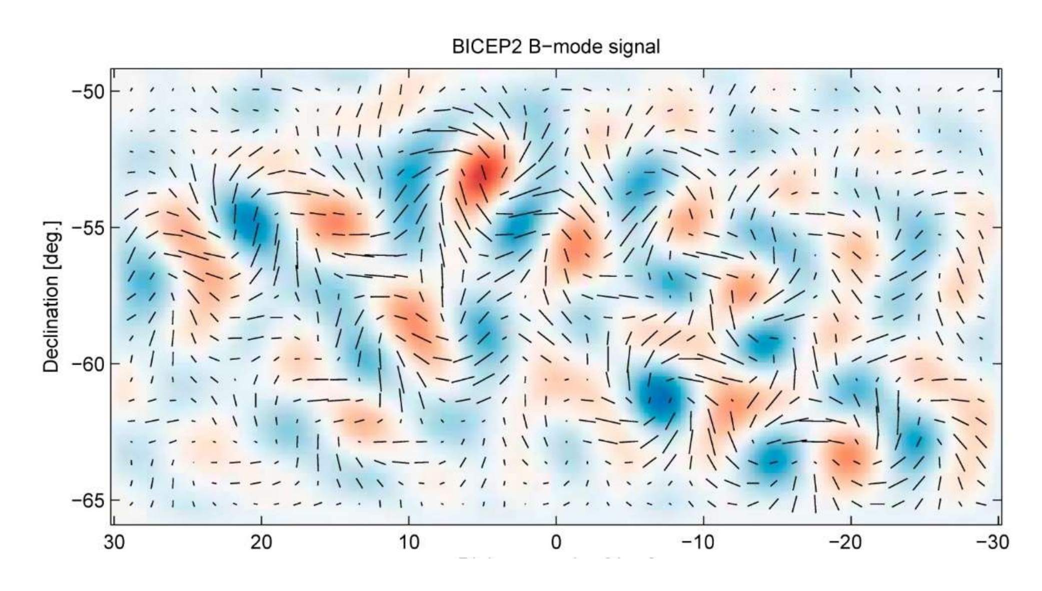
Existen dos mecanismos que pueden producir esto último gracias a la existencia de zonas con energías heterogéneas en su interior: los flujos de plasma o las ondas gravitatorias. En los *flujos de plasma* a velocidades relativistas, el electrón en su movimiento "ve" que le vienen más rápidos los fotones que se le acercan por delante o detrás, en la dirección de su movimiento, que los que le vienen por los lados. A mayor velocidad de los fotones, mayor es su energía y la temperatura. Luego estaríamos en el caso de que el electrón *ve una dirección principal* en las interacciones con la radiación, por lo que los fotones dispersos tendrán una componente polarizada. En el caso de las *ondas gravitatorias* lo que sucede es que cuando pasa una de ellas el espacio se estira y encoge, achatándose alternativamente a lo largo de dos ejes ortogonales. Como consecuencia, los fotones que se desplazan en estas dos direcciones ortogonales tendrán distinta velocidad, y el electrón que interactúe con ellos, por las mismas razones antes expuestas, entra en el proceso de emisión de un fotón con una componente polarizada preferentemente en un plano.



Patrones de polarización de los modos E y B. Cada línea es la dirección de la polarización (Imagen de la red, fair use)

De hecho se producen dos tipos de polarizaciones, la E y la B, con patrones muy distintos cuando las observamos, como se ha intentado hacer ver en la imagen anterior. Se da la circunstancia de que los flujos masivos de plasma, que generan polarizaciones del tipo E, no pueden generar polarizaciones del tipo B, que requiere complejos flujos circulares que no se dan en el movimiento del plasma, pero sí en las ondas gravitatorias. Por consiguiente, el patrón de modo E que podamos extraer de la imagen primera de la radiación de fondo nos va a dar información del flujo y reflujo del plasma original, mientras que el patrón de modo B nos dará información sobre el estiramiento y achatamiento del espacio-tiempo, las ondas gravitatorias. Los modos E son del orden diez veces más débiles que las anisotropías de temperatura -recordemos que estas últimas son del orden de 1 en 100.000-, pero son más intensos que los modos B.

Mucha información, sí… pero de difícil detección. Sabemos de los modos E desde el año 2002, pero aún andamos en la pelea de exprimir los modos B desde el fondo de microondas. Por el experimento LIGO[8] sabemos que las ondas gravitatorias realmente existen, las hemos medido, pero el patrón de polarización B nos daría una información fantástica de lo que pasó justo tras la expansión inicial, en el momento $t=10^{-32}$ segundos ¡casi nada!



Información real del proyecto BICEP-2. En donde se observan patrones del modo E y alguno que pudiera ser del modo B. En la realidad esto último se desestimó al afinar los análisis, pero así serían (Imagen: Proyecto BICEP 2, fair use)

Toca ya concluir la exposición que hemos hecho de algunas de las enseñanzas, las más importantes, que podemos extraer de la antigua foto de familia del universo. La historia debe continuar. Después de que la materia y la radiación se desacoplaran y la onda de sonido se congelara, cuando el Universo tenía tan "sólo" 380.000 años de edad, la gravedad siguió ejerciendo su labor. La materia oscura y la bariónica siguieron concentrándose a partir de aquellos puntos donde las había dejado el proceso de la onda acústica. Con el tiempo, estas perturbaciones gravitatorias formaron las galaxias, de forma que la separación fijada por el horizonte acústico es la base del patrón de la distribución de las galaxias tal como lo vemos hoy. Lo iremos analizando en capítulos posteriores.

Hemos visto cómo el haber podido conocer el patrón de anisotropías de la radiación fotónica de fondo nos ha permitido profundizar en la esencia del Universo. Queda a la espera toda la información de aquellos neutrinos que se desacoplaron de los bariones prácticamente a un segundo de la expansión exponencial inicial. Sería la foto de los más remotos inicios, formada por las anisotropías de los neutrinos primigenios que andan por ahí, aún más fríos que los fotones. La imagen de su manumisión será mucho más compleja de obtener: no sólo es que quedó "oculta" dentro de la del plasma en donde se independizaron de los bariones, sino también que hoy en día tienen una energía debilísima, muy próxima a la propia del cero absoluto, y además interactúan sólo con la gravedad -con su ridícula masa- y la fuerza débil, por lo que son unos bichos muy esquivos.

Con eso liquidamos una época en la que dominaba la radiación y en la que se formaron las bases del Universo que observamos hoy en día. A partir de los siguientes capítulos intentaremos ver cómo fue evolucionando el mundo de la materia.

NOTAS DEL CAPÍTULO 19:

1. Podéis repasar lo que se dijo acerca de este tema en los capítulos 15 y 16.

2. Tomamos la máxima diferencia de temperaturas en campos de 0.4º, ΔT_i, y sacamos su promedio, que será el dato para este ángulo en la curva de anisotropías.
3. Esta circunstancia se aclaró en el capítulo 16.
4. Hablamos con un mayor detalle de este misterio en un capítulo posterior.
5. Nos permite decir esto el hecho de que el tercer pico sume los efectos del tercer armónico de la onda sonora, la cual es impar y por tanto incorpora efectos compactadores de la materia.
6. Podéis preguntaros por qué en todo este reparto de la densidad crítica no hemos tenido en cuenta el efecto de la radiación. ¿Y todos los tibios fotones de la radiación de fondo? ¿Y todos los energéticos fotones que se han generado en las estrellas tras la recombinación? ¿Es que todos estos no aportan energía? Curiosamente tenemos que decir que así es, su aporte energético es despreciable frente al de la materia en sus dos vertientes y al de la energía oscura. La aportación de los fotones de fondo es del orden de 10^4 veces menor y la de los fotones de las estrellas incluso aún diez veces menos: a pesar de su alta energía hay muy pocas estrellas por unidad de volumen en el Universo.
7. En el plasma primordial, justo en los momentos antes de la recombinación, una partícula debía recorrer hasta 10.000 años luz antes de encontrarse y chocar con otra.
8. **LIGO** es un observatorio de detección de ondas gravitatorias. La sigla proviene de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* -observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser-. La primera observación directa de una onda gravitatoria se produjo el 14 de septiembre de 2015.

20: La materia entra en faena.

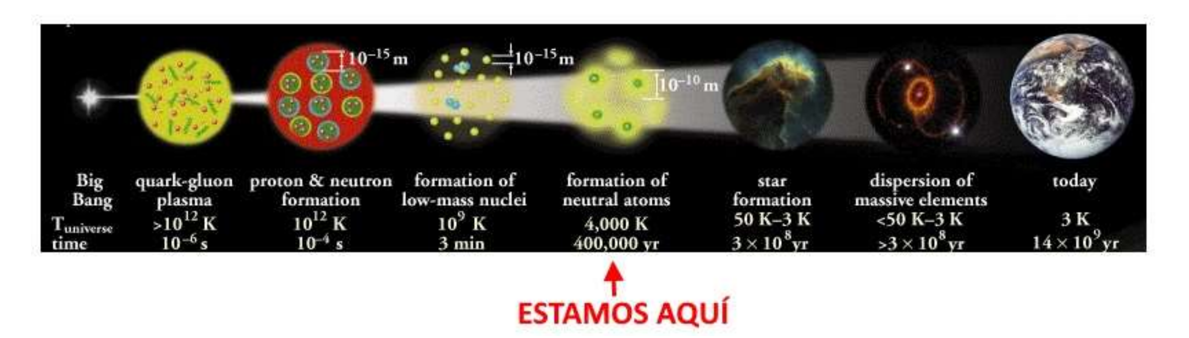
poco después de t=380.000 años desde el inicio

El Cosmos se estaba aproximando a una juvenil edad de 380.000 años. Sus habitantes eran partículas variadas, unas bastante conocidas como los protones, electrones, núcleos de helio y neutrinos. Otras aún son incógnita para nosotros, como las que pensamos forman la materia oscura. La radiación representada en los fotones culebreaba en este mundo de plasma chocando con sus vecinos, principalmente los electrones, que, molestos por los reiterados y empecinados ataques, no conseguían unir sus cargas negativas con las positivas de los protones. De todas formas, las partículas en su conjunto iban ajustando sus energías, y por tanto sus amplitudes de ondas, a las teóricas que fija el espectro de radiación típico de un cuerpo negro a 3.000K, que es lo que era el Universo en aquel entonces.

Un poco antes la generalidad de los fotones había desacelerado su velocidad hasta el equivalente a unas energías de 13,6 eV, es decir, unos 92 nanómetros de longitud de onda, el límite fijado por la fuerza electromagnética para la unión entre electrones y protones. A partir de ahí, y a medida que el Universo se fue expandiendo enfriando a los fotones, se iba también ampliando su longitud de onda, lo que iría reduciendo el número de sus interacciones con los electrones y dejando en primer plano a la cada vez más activa fuerza de atracción de cargas opuestas. La consecuencia es que en aquel plasma se iban condensando, por unión de un protón y un electrón, átomos de hidrógeno neutro. Fue el momento, más bien un largo momento, de **la recombinación**. Como salían de un plasma relativamente homogéneo, en el nuevo mundo los hidrógenos también ocuparon todo el volumen posible de forma casi homogénea.

A través de los capítulos anteriores habíamos avanzado hasta este momento. Bien es verdad que en el último, y también en alguno anterior, nos habíamos detenido para entender la teoría que nos ha permitido bucear en las interioridades de la materia y la radiación de

aquella época. Tras el pequeño recordatorio de los dos primeros párrafos anteriores, vamos a continuar el camino.



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

En este momento los fotones, con una energía promedio ya tan baja icomo de 1 eV, pudieron volar por el cosmos de forma libre sin tropezarse en su camino, como les pasaba antes de la recombinación, con los electrones y su cohorte de protones que le andarían alrededor al olor de la carga. En aquellos instantes comenzaban a formar parte del espectro infrarrojo. Si hubiera existido un hombre por aquellos andurriales quizás hubiera percibido un ligero resplandor, provocado por la pequeña fracción de fotones que en su enfriamiento aún iban saliendo de las últimas frecuencias visibles en el rojo hacia su destino final en las microondas.

El Universo se transformó en un vacío oscuro.[1] Aquellos fotones primigenios, unos 1.000 millones por cada protón existente, aún corren por ahí y llenan nuestro espacio. Los que nos rodean en este preciso momento surgieron de una zona situada a 13.400 millones de años luz de nuestro punto de observación. Eso sí, ahora nos llegan mucho menos energéticos, más fríos que entonces por efecto de la expansión del tejido espacio-tiempo que se ha venido produciendo desde entonces y que lo ha hecho crecer unas 1.100 veces. Por lo tanto, 1.100 veces más frío. Los hemos visto en la foto de la radiación de fondo de microondas situados en un invierno de 2,725K, con una longitud de onda de casi dos milímetros, mucho más allá de la escasa micra del color rojo.

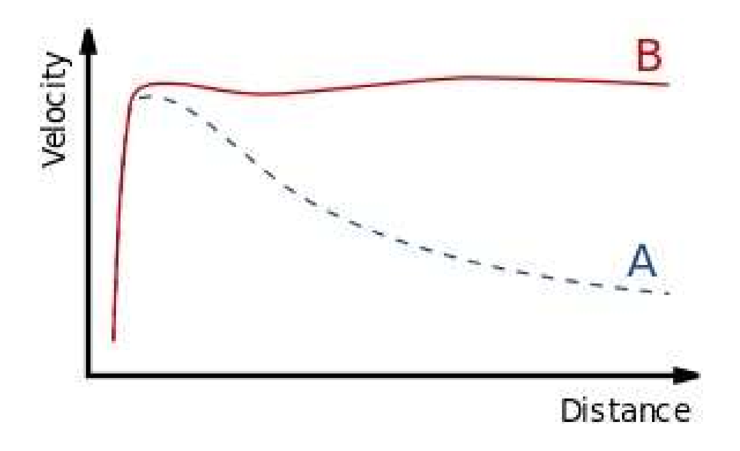
Pero volvamos a aquellos turbios momentos, con nuestra sopa mayoritariamente de hidrógeno atómico neutro y una radiación

infrarroja. Podemos imaginar que todo hubiera acabado allí, ya que la energía cinética de los fotones ni de lejos era suficiente como para excitar el electrón orbital del hidrógeno, ni tampoco al del helio, lanzándolo a mayores alturas energéticas. Los astrónomos, tramoyistas sobrepasados, han bautizado a esta época posterior a la recombinación como la **era oscura**. Dados los niveles energéticos del momento la época de la radiación dominante había muerto. A partir de ahora iba a mandar la gravedad… con el permiso de la energía oscura.

No obstante, el Cosmos es una caja de sorpresas y maneja siempre algún que otro truco. Nos hemos olvidado, en aras a la claridad de la descripción del paisaje, de otro misterioso personaje: la materia oscura. No sabemos muy bien lo que pueda ser, aunque es fácil pensar que serán partículas con masa no excesivamente grande, pues están haciendo su labor desde el inicio de los años y, por consiguiente, tienen que ser muy estables ¿Por qué es fácil que tengan masa? Porque sabemos de ellos gracias a los tirones gravitatorios que ejercen sobre la masa bariónica, la que nosotros conocemos, vemos y medimos. Luego han de tener masa.[2] Y, además, sabemos que ya existían desde antes del momento de la recombinación.

¿Y a qué viene ahora hablar de la materia oscura? Pues a que durante su historia inmersa en el plasma anterior a la recombinación ejerció una labor crucial. Por un lado, magnificando a lo largo de los primeros 380.000 años de expansión del Universo los grumos de energía-materia producto de las inestabilidades cuánticas anteriores a la inflación.[3] Por otro lado, a que se cree que fue la gran responsable que generó la influencia gravitatoria que inició el colapso del hidrógeno atómico surgido de la recombinación. Este hidrógeno primigenio presentaba ya de por sí ligeras variaciones en la distribución de su densidad poblacional a través del espacio, pero quizás no hubiera sido suficiente, o el proceso hubiera sido extremadamente largo como para cebar la espoleta que inició la gran concentración gravitatoria. Y esto lo generó la materia oscura, que logró cuajar las ligeras diferencias iniciales locales de masa bariónica, dando lugar a la arquitectura cósmica que contemplamos hoy en día, espuma, filamentos y paredes de gases, polvo y galaxias.

Posiblemente la materia oscura permea una gran parte del universo y, aunque no sabemos de qué está compuesta, tenemos evidencias indirectas de ella. Es lo que explicaría las incoherencias en las velocidades de ciertas agrupaciones celestes. Una de ellas son los cúmulos de galaxias -nuestra Vía Láctea orbita en uno de ellos, que llamamos Grupo Local- en donde las más exteriores giran a velocidades superiores a lo que les tocaría si allí sólo hubiera masa bariónica. Otra pista la sacamos al observar las velocidades de giro de las estrellas dentro de las propias galaxias, en donde las más externas lo hacen de forma no coherente con la cantidad de materia ordinaria visible. Otro fenómeno que nos permite detectarla es el efecto de lente gravitatoria que ejerce "algo" desconocido en el Cosmos, y que debemos suponer es la materia oscura, sobre la luz emitida por focos que se encuentran detrás de ese "algo". Así se ha podido estimar que la vía Láctea tiene diez veces más materia oscura que materia bariónica, o bien que incluso hay galaxias compuestas prácticamente en su totalidad por materia oscura.



Curva de rotación de una galaxia espiral típica: predicho (A) y observado (B). La materia oscura explicaría la apariencia plana de la curva de rotación en radios grandes (Wikimedia, Phil Hibbs, CC BY-SA 3.0)

En los capítulos anteriores hemos mencionado reiteradamente a este tipo de materia. Y sabemos de su trascendencia en la forma e intensidad de las ondas sonoras que conformaron los patrones de distribución de la energía y materia en el momento de la recombinación. Y siempre avisamos, además, de que no teníamos ni idea de lo que eran, lo que nos deja en posición muy cómoda como

para hacer mil argumentaciones acerca de sus posibilidades. La casuística que idea nuestra imaginación -y nuestras teorías- abarca desde *materia bariónica* "caliente" -que se mueve próxima a la velocidad de la luz, como pudieran ser los neutrinos escapados del plasma al segundo de iniciarse el Big Bang- o materia bariónica "fría" -agujeros negros, estrellas enanas marrones y cosas así que no podemos detectar-[4], a la *materia NO bariónica* también de los dos tipos desde "fría" a "caliente" -que pudieran ser partículas ligeras del tipo de los axiones, neutrinos estériles[5] u otro tipo de partículas masivas de interacción débil (WIMP's), que incluyen a los neutralinos-.[6]

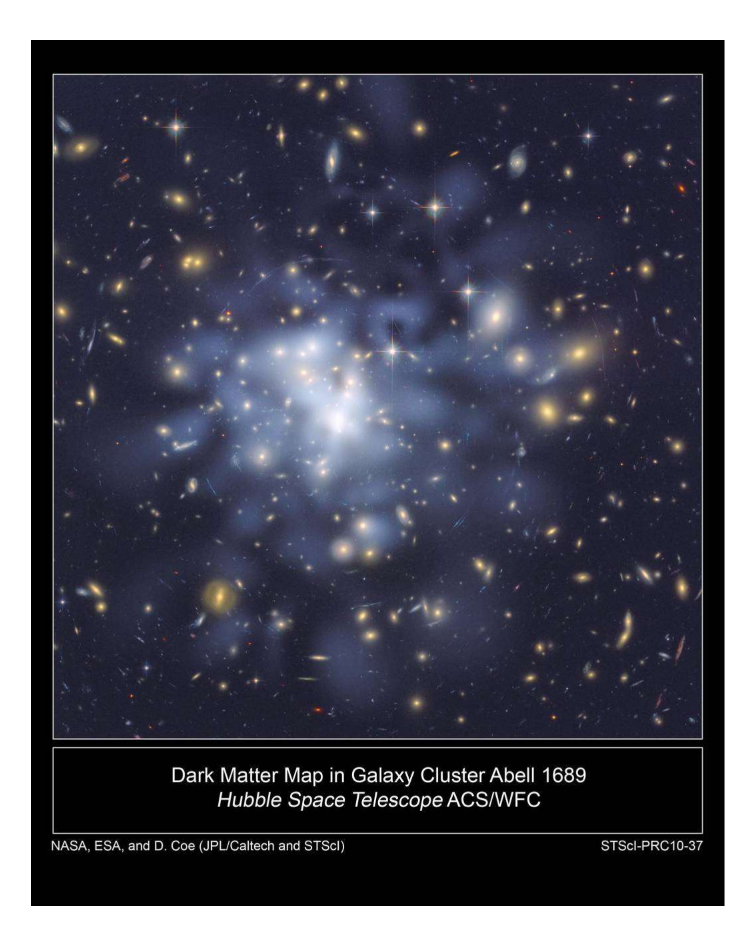
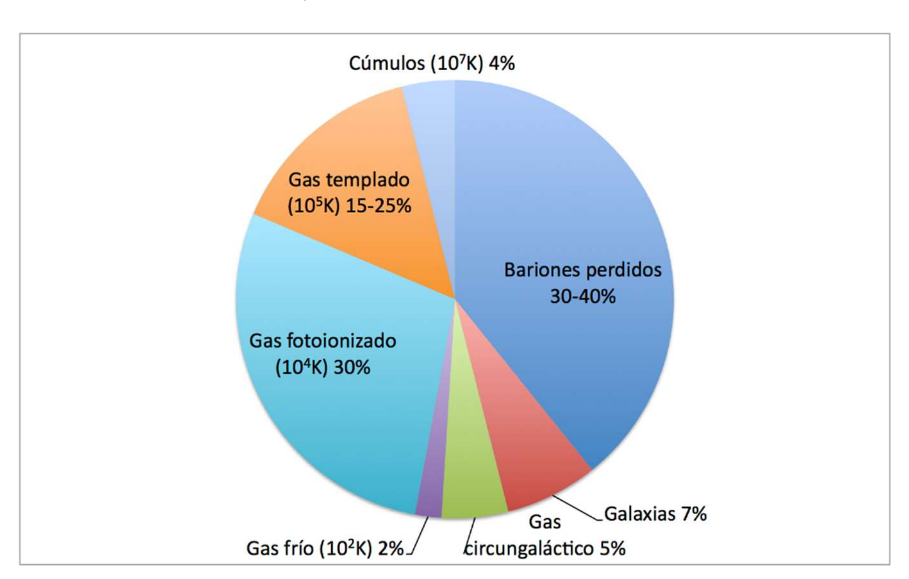


Imagen forzada de la materia oscura. Los científicos de la NASA han sobreimpuesto encima del fondo de galaxias una mancha en azul -la materia oscura- que es reflejo de los resultados de los cálculos hechos a partir de la observación de 135 imágenes de galaxias deformadas por lentes gravitatorias. De ellas, se ven claramente un par en la esquina inferior derecha (Imagen: NASA, dominio público)

De todas formas, bastante tenemos con averiguar dónde podemos encontrar a nuestra familiar materia bariónica del Modelo Estándar, la que sabemos que explica un escaso 5% de lo que hay en el universo y que acompañó a la materia oscura cuando la clarificación de la recombinación, para dibujar conjuntamente las estructuras del universo que observamos hoy en día. Con la tecnología actual a lo más que hemos llegado es a decir que del total de la materia bariónica un 7 % está recluida en las *galaxias* -en la forma de estrellas, planetas, medio interestelar…-. Más o menos un 5 % adicional están formando *gases arrojados por vientos y flujos de las galaxias*, pero atrapados en sus alrededores por la gravedad de la propia galaxia. En aquellas zonas donde la materia oscura se ha concentrado más y se han acumulado galaxias hasta formar un *cúmulo de galaxias,* hay también atrapado un 4 % adicional de materia ordinaria a temperatura de decenas de millones de grados y que podemos ver con los telescopios actuales de rayos X.



Distribución de materia ordinaria bariónica conocida en el universo (Imagen: Xavier Barcons, IyC 2015, fair use)

El resto de la materia bariónica que hemos conseguido detectar es tan tenue que no brilla lo suficiente para que la podamos ver directamente. Sin embargo, observando fuentes muy brillantes y lejanas -como son los cuásares-, vemos que un 30% de esa tenue materia ordinaria se encuentra en *bolsas de hidrógeno fotoionizado* -para entendernos, protones, núcleos de hidrógeno sin su electrón- por los propios cuásares y las galaxias, y que tienen una temperatura de

unos diez mil grados. Aún más sutilmente creemos detectar trazas de otro 15-25 % que se encuentran formando *nubes de gas a una temperatura de unos cien mil grados*. El restante 30-40% que no detectamos creemos que aún siguen atrapados en las acumulaciones de materia oscura, a temperaturas de millones de grados, siguiendo sus estructuras filamentosas, sin haber llegado a cuajar en galaxias.

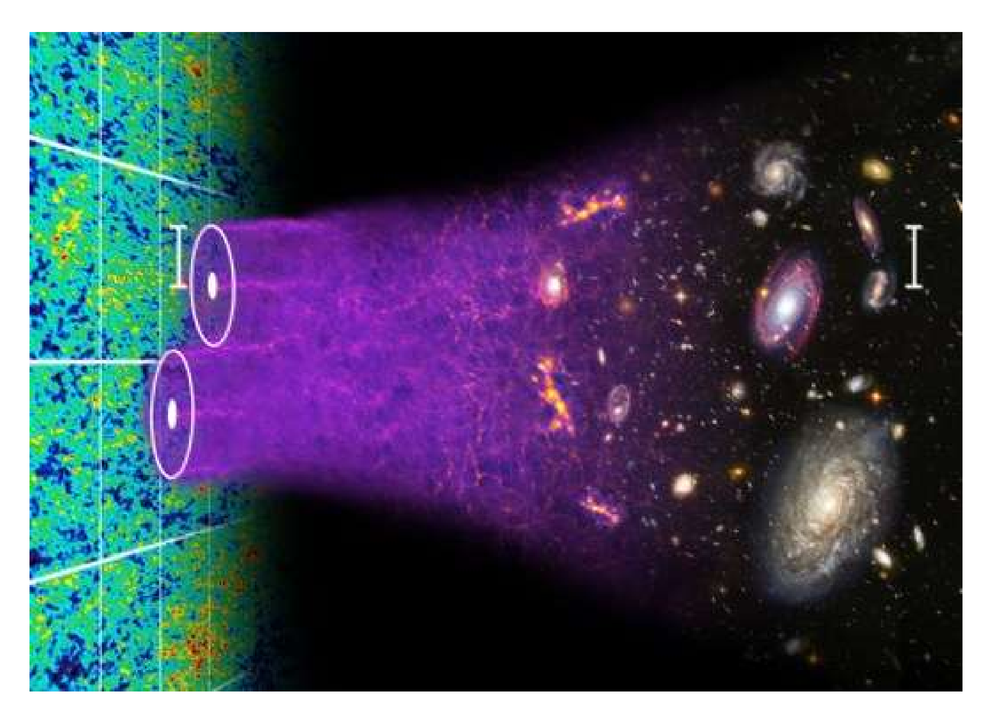
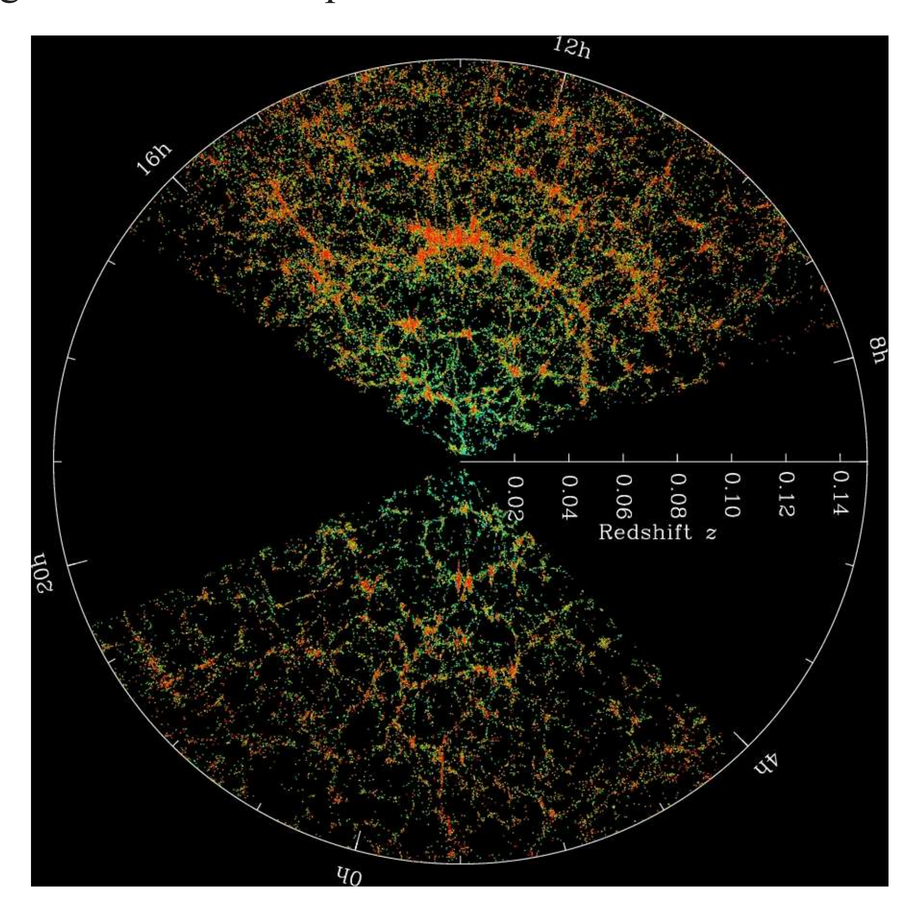


Ilustración de cómo las oscilaciones acústicas generadas por el movimiento de los bariones, que quedaron congeladas en el momento de la recombinación, pueden seguir siendo observadas a día de hoy en las imágenes reales de las estructuras del Universo. La barrita blanca representa el horizonte acústico actual (Imagen: Chris Blake y Sam Moorfield, fair use)

Cuando quedaron libres a los 380.000 años del Big Bang, tanto materia ordinaria como oscura proyectaron sus patrones de distribución espacial hacia el futuro gracias a la expansión continuada del universo. La gravedad que inducían fue el motor para la temprana concentración de masas en el universo. Con una peculiaridad ya que podemos pensar que todo tipo de estructuras evolucionaban de forma homogénea y homotética: las galaxias colapsaban a mayor velocidad que los cúmulos y supercúmulos.[7] Por poner datos, gracias a la expansión y la gravedad se había pasado desde un mundo con variaciones medias de la densidad de la materia de 10^{-6}, que es lo que

vemos en el telón de fondo de la radiación de microondas, a unas variaciones con respecto a la densidad media del universo de 10^{+2} para las grandes estructuras -los cúmulos- y a unas variaciones de 10^{+6} para las pequeñas estructuras como las galaxias.

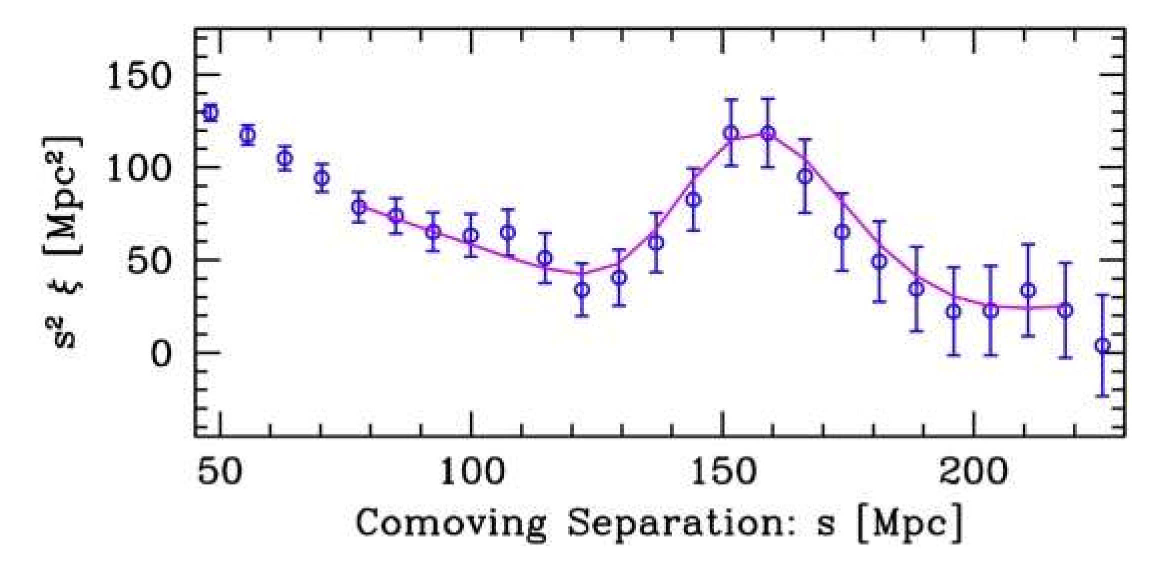
En la figura de la página anterior se intenta hacer visual la idea de cómo el horizonte acústico de la recombinación se proyecta hasta el momento actual, 1.100 veces mayor, para dibujar el patrón de galaxias y cúmulos que observamos hoy en día. La imagen, aunque la de aquí arriba es una representación artística, no es una entelequia, ya que esa circunstancia la hemos podido constatar con una gran precisión gracias al mapeado tridimensional del universo que las tecnologías modernas nos permiten confeccionar.



Distribución de las galaxias cercanas realizadas por el programa SDSS -Sloan Digital Sky Survey- que está realizando un masivo estudio espectrométrico del Universo (Imagen: Programa SDSS, fair use)

El proyecto Sloan Digital Sky Survey (SDSS)[8] lleva desde el año 2000 cartografiando en 3-D una cuarta parte del cielo visible, lo que

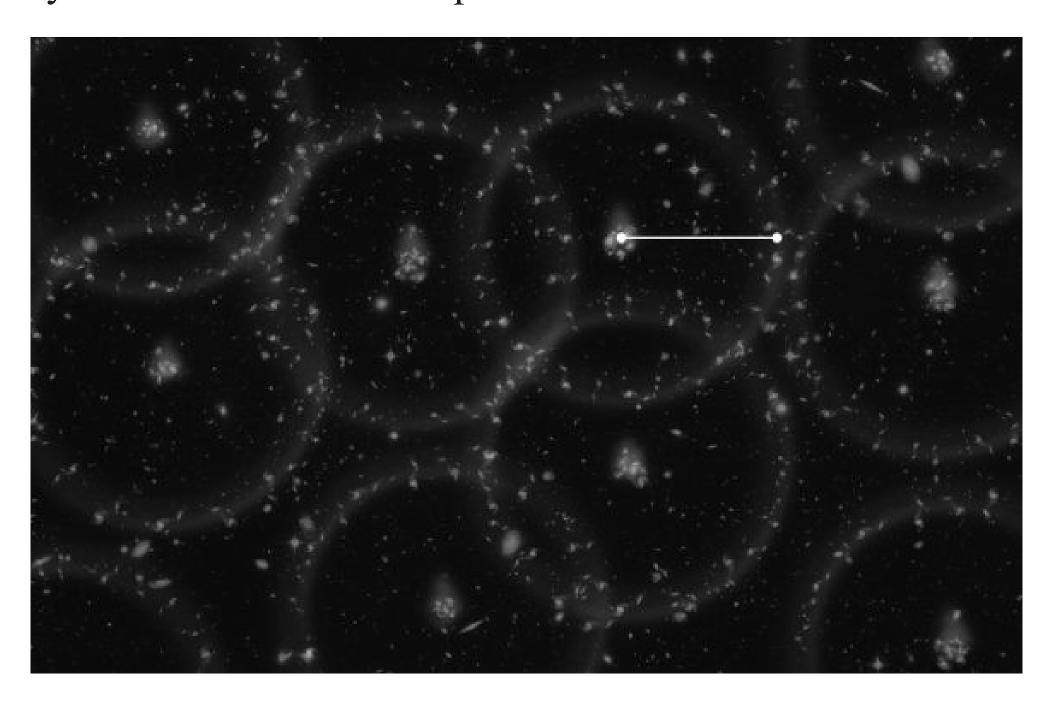
ha permitido obtener el modelo real de la distribución de objetos -galaxias- de esta parte del universo. A partir de esta foto real se ha hecho un estudio muy parecido al que ya explicamos para la radiación de fondo,[9] es decir, se han medido las distancias entre todos los pares de galaxias de un grupo de 1,2 millones de ellas y se ha hallado la distribución según distancias, lo que ha permitido hallar una correlación entre el número de pares de galaxias distantes entre sí un valor X, con la distancia X que las separa. El resultado es la siguiente curva en la que en el eje vertical está la frecuencia con la que encontramos dos galaxias separadas una determinada distancia[10] y en el eje horizontal está esta distancia.



Resultado a partir de los datos de BOSS (SDSS) que indica la tendencia en la intensidad de la agrupación de galaxias -eje vertical- en función de su separación -eje horizontal- como se explica en el texto. El eje de ordenadas se ha multiplicado por s^2 para magnificar la visualización. Un Mpc (megaparsec) equivale a 3,26 millones de años luz (Imagen: Ashley Ross et al, a partir de libro "The Dark Univers", pag. 18, Catherine Heymans, 2017, fair use)

Deberíamos esperar que para distancias pequeñas, al estar las galaxias metidas en el mismo halo de materia oscura, la población de pares fuera mayor, mientras que a medida que vamos ampliando la separación la población se fuera ajustando al valor de como si estuvieran distribuidas en el espacio de forma aleatoria. Realmente eso es lo que se puede apreciar en la curva anterior: es más normal

que las galaxias estén próximas entre sí en el entorno de las pequeñas distancias.[11] Pero vemos también una anomalía en la separación de 150-160 megaparsecs, es decir, vemos un máximo fuera de la tendencia situado en valores de la distancia entre galaxias de 490-520 millones de años luz: las galaxias tienden a formar cúmulos de estos tamaños. Lo cual es muy consistente con el tamaño del horizonte acústico postulado como consecuencia del que se había generado en la recombinación y que se puede estudiar en la imagen de la radiación de fondo de microondas (hoy en día unos 490 millones de años luz) como ya comentamos en el capítulo 18.



Representación artística de cómo las estructuras actuales del Universo siguen los patrones fijados por el tamaño del horizonte acústico salido de la recombinación -representado por la barra blanca- (Imagen: Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

A partir del tamaño de los cúmulos los científicos han determinado, con una precisión del 4%, la relación entre el tamaño del universo ahora y el tamaño del universo justo después del Big Bang. Lo que les ha permitido, por un lado, afianzar la idea que teníamos de que la expansión del Universo se acelera por la presencia de la energía oscura, y por otro les ha permitido asegurar aún un poco más el hecho de que la acumulación regular de galaxias deriva directamente de las ondas de presión y del tamaño de esas ondulaciones que había en el

plasma caliente primitivo. Si nuestros ojos fueran instrumentos adecuados lo podríamos percibir en el cielo, veríamos grandes discos que ocupan el doble del tamaño de la Luna. En algún capítulo posterior hablaremos de estas estructuras.

Ahí tenemos las bases de la configuración arquitectónica de nuestro Universo. Al poco de la recombinación lucían las primeras galaxias con su colección de estrellas de la población III. Ya veremos qué es de ellas.[12] Galaxias como la GN-z11, que por encontrarse en un corrimiento al rojo[13] de z=11,1 sabemos que corresponde a una época 400 millones de años tras el Big Bang. O el cuásar ULAS J1120+0641, con un corrimiento al rojo de z=7, a menos de 770 millones de años tras el Big Bang.

La radiación ultravioleta que se generaba en los hornos nucleares de estas primeras estrellas y cuásares recalentarían las nubes gaseosas de sus alrededores, provocando una rotura de los átomos de hidrógeno que, en su mayoría, quedaron de nuevo ionizados como antes de la recombinación. Eso se produjo en la edad de **la reionización** que será el objeto de dentro de dos capítulos ya que en el siguiente aún nos queda desmenuzar lo que acabamos de apuntar: ¿qué es lo que pasó entre los 380.000 años y la época de la reionización?

NOTAS DEL CAPÍTULO 20:

1. Para el ojo humano, claro.
2. Para explicar la materia oscura hay bastantes teorías. Incluso que sea un campo más, como el de la gravedad, que interactúe con la materia. En este artículo del blog "*Neofronteras*" titulado "*Actualidad sobre materia oscura*" (enero 2017) podéis ver un repaso general de la situación del tema.
3. Ya hablamos en el capítulo 15 de cuán crucial pudo ser su papel en la distribución de la materia y la radiación mientras se expandían las burbujas de inestabilidad cuántica, dibujando un particular horizonte acústico.

4. Ese tipo de "cuerpos" se les conoce como MACHO's (de su acrónimo en inglés: *Massive Astrophysical Compact Halo Object*) u objeto astrofísico masivo de halo compacto. Un MACHO es un objeto pequeño de materia bariónica que se mueve por el espacio interestelar de manera aislada (no se encuentra asociado a ningún sistema solar) y que emite muy poca o ninguna radiación.

5. En este enlace a Wikipedia podéis ver en qué consiste tal esterilidad de los neutrinos:

[http://neofronteras.com/?p=5261]

6. Redirijo de nuevo vuestra atención hacia la serie del blog "*El Tamiz*" titulada "*Esas maravillosas partículas*", en especial las cuatro últimas dedicadas a la materia oscura y sus posibles "responsables".

[https://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]

7. Eso es debido a que el tiempo de colapso de una cierta materia contenida en una burbuja de gas -supongamos una esfera- y por tanto con una densidad ρ, sigue la siguiente ley: t=[2/Gρ]*1/2. Por tanto las bolsas de gas más densas, que darían nacimiento a las galaxias, colapsaban más rápidamente -del orden de cientos de millones de años- que las bolsas de gas menos densas, las que darían a luz a los cúmulos, que seguirían un proceso más lento -del orden de los diez mil millones de años-. Hay que decir que en las concentraciones más densas de materia, como las galaxias, se daban a la vez otros procesos a niveles moleculares por los que se disipaba energía, lo que iba a favor de una más duradera actuación de la gravedad compresora. Por todo ello los cosmólogos afirman, me imagino que de forma coloquial, que las galaxias son formaciones moribundas mientras que los cúmulos aún están con plena vitalidad.

8. En este enlace podéis encontrar la página oficial de dicho proyecto:

[http://www.sdss.org/]

9. Con la radiación de fondo el parámetro era la distribución de diferencias de temperatura según tamaños de arco del cielo.

10. Realmente tenemos que decir que el parámetro **$\xi(Mpc^2)$** indica el número relativo de pares de galaxias separadas por una distancia **s** en Mpc -megaparsec- con relación al número de pares que saldrían bajo la suposición de que toda esta población estuviera distribuida en el espacio de forma aleatoria.

11. Lo cual sería esperable si lo vemos de otra manera, ya que en la profundidad de la edad del Universo había bastante menos galaxias que ahora. Si las galaxias fueran en su mayoría muy antiguas, la expansión del Universo desde las edades tempranas -un factor 1.100 desde la recombinación- las habría separado mucho, cosa que se detectaría en la curva, que estaría desplazada hacia la derecha.

12. Las estrellas están agrupadas en tres tipos de familias. Las más jóvenes son las de Población I y las más viejas de Población III. Se diferencian no sólo en su edad, sino también por los elementos químicos que las componen.

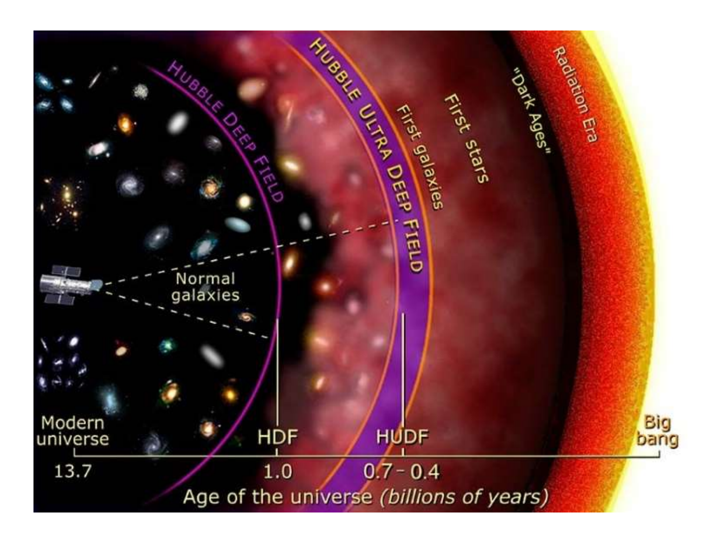
13. Ya veremos también qué es esto del "corrimiento al rojo" con más detalle en un capítulo posterior, pero tiene relación con la edad de la luz que recorre el Universo. A más edad, más corrimiento al rojo. Hoy z=1.

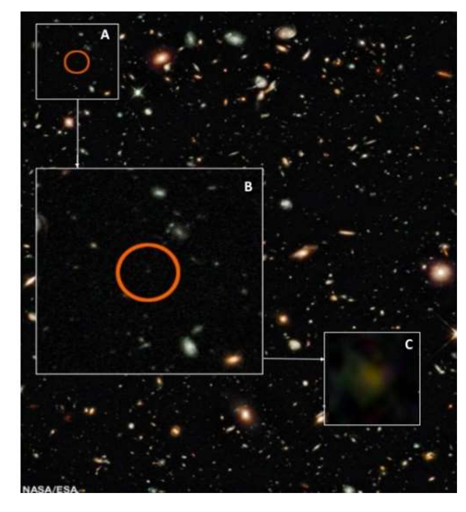
21: La era de la gran oscuridad

de 380 mil a unos 200 millones de años desde el inicio

Volvamos a la materia oscura, cosa que nos ayudará a recuperar el relato de lo que estaba pasando en el Universo. En el capítulo anterior estuvimos desbrozando la biografía del Universo y nos habíamos quedado en el momento del paso del mundo dominado por la energía al mundo dominado por la materia, cuando los fotones se liberaron. La foto de aquel momento de la radiación de fondo nos dio pie a hablar de la estructura del Universo, y de cómo hay más cosas que la materia visible y los neutrinos y fotones primigenios. Evidentemente, estas "más cosas" tuvieron que ejercer un papel muy importante en el proceso. En especial la materia oscura con su más que significativo efecto gravitatorio, ya que era cinco veces más abundante que la materia bariónica. La teoría es lo que vas a leer en este capítulo y el siguiente.

Gracias al telescopio Hubble se ha podido observar en lo más profundo del Universo lo que parecen ser pequeñas galaxias, las más claras, a una distancia equivalente a unos 900 millones de años tras el Big Bang.[1] E incluso anteriores, a los 700 millones de años, pero de luminosidad más débil y en menor cantidad. Sus formas no son las "convencionales" y están muy lejos de las de las galaxias espiral o elípticas que vemos hoy en día. Estas extrañas galaxias son la crónica de un período cuando el universo era más caótico. Son fotos realmente muy antiguas, lo que nos permite asegurar que *la estructura del Universo se inició muy pronto*. Y si de esas estructuras la materia oscura fue el alma fundamental y la materia bariónica su cuerpo visible, tenemos que convenir que ambos actores habrían comenzado su trabajo en un momento muy temprano.

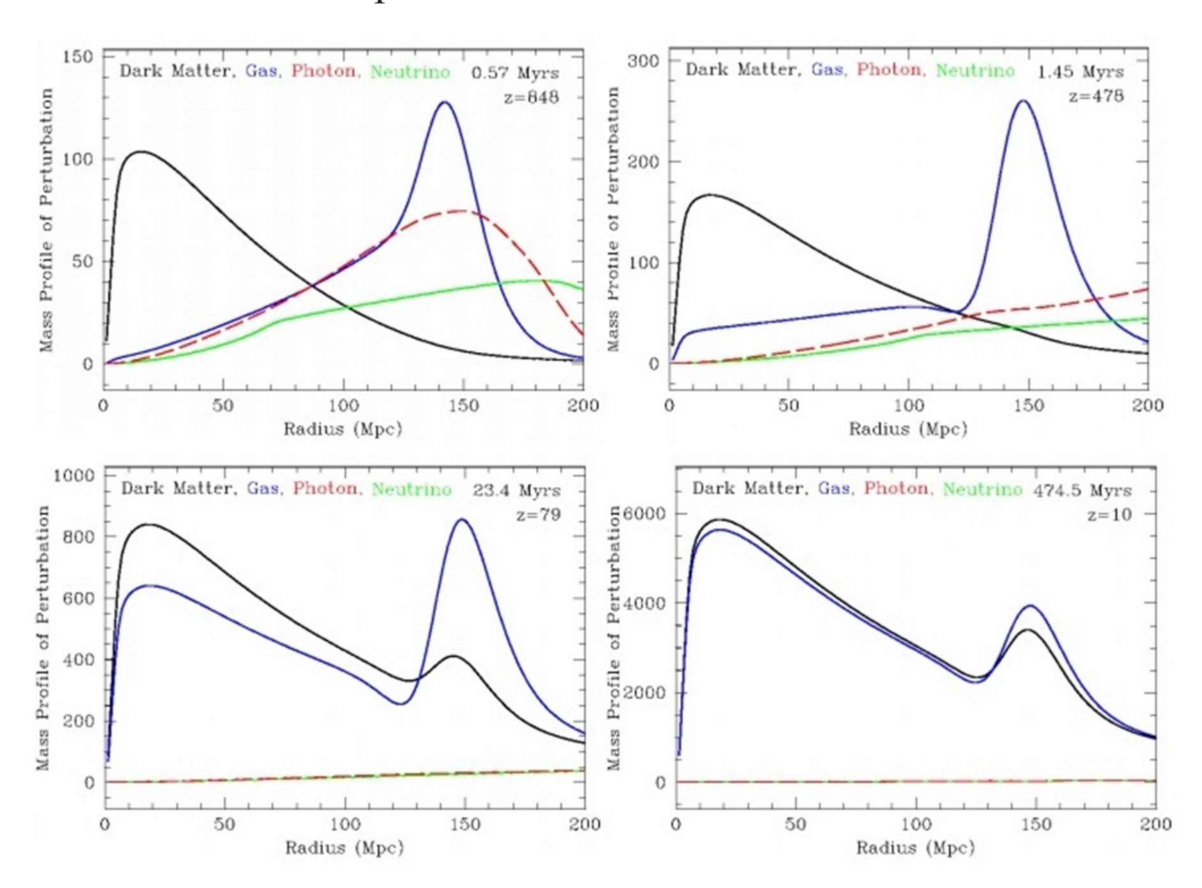




A la izquierda un esquema del Universo con la capa del campo profundo donde mira Hubble (Wikimedia, NASA, dominio público). A la derecha una doble ampliación sobreimpuesta al campo ultraprofundo: a partir de [A] una pequeña mancha de luz en la esquina superior izquierda se ha ampliado [B] de forma que ahora se ve minúsculo un punto rojo. La segunda ampliación [C] da idea del sutil halo de luz que proviene de tal galaxia: ***UDFy-38135539****, la más profunda conocida por Hubble en un corrimiento al rojo Z de 8,6, lo que corresponde a una edad aproximada de 500 millones de años (Imagen montada a partir de varias de NASA, wikimedia, dominio público)*

Se cree que aún antes de la recombinación, cuando todavía no se estaban juntando los electrones y los núcleos, ya se estaba gestando la semilla de lo que luego sería la estructura de la materia oscura. Como sabemos, eran momentos plasmáticos, por lo que materia oscura y materia luminosa -la bariónica- debían estar entrelazadas, de forma que así tuvieron que seguir tras la recombinación. Esta íntima unión entre ambas materias tuvo de algún modo su reflejo en la foto inaugural de los fotones que constituyen la radiación de fondo de microondas. Ya desde estos momentos, y a partir del esquema que dejaron las ondas sonoras del plasma, empezó a trabajar la materia oscura, modelando lo que iba a ser la arquitectura futura del Universo, hasta la actual. Por su gran abundancia, ella tuvo que ser la primera a la que la gravedad obligó a formar agrupaciones arrastrando a su vera a la materia bariónica. Conjuntamente empezaron a amplificar aquellas pequeñas heterogeneidades que veíamos en la foto de la

radiación de fondo y que comparábamos con inapreciables ondulaciones de una piscina.



Evolución radial de los perfiles de masa de materia y radiación que corresponde al interior de una burbuja de inestabilidad cuántica que generó el horizonte acústico. Son la continuación cronológica de los perfiles que ya vimos en un capítulo anterior (Imagen: a partir de D. J. Eisenstein y otros, fair use)

En la serie de gráficos de arriba podemos apreciar con más detalle esta evolución inicial. Cada una de las curvas dibuja la evolución de materia y radiación correspondiente a una burbuja de inestabilidad cuántica primigenia en un momento determinado -en millones de años, Myrs- para un corrimiento al rojo determinado -z-. Las unidades del radio, o avance de onda, están estandarizadas a las dimensiones actuales del Universo. Para pasar a las de la época correspondiente basta dividirlas por la z del momento. El extremo último del horizonte acústico está situado más o menos sobre el radio 150 Mpc.[2] Vemos cómo la materia oscura prácticamente se había quedado anclada en su pozo gravitatorio próximo al punto de partida, desde donde había empujado a los bariones a los confines del

horizonte acústico. Podemos observar cómo el gas bariónico deja de estar acoplado con la radiación de fotones cayendo, con el tiempo, de nuevo en brazos de la materia oscura. Próxima la edad a los 500 millones de años ambas materias estarían prácticamente ensambladas, mientras que la presencia de fotones y neutrinos se fue disolviendo con el tiempo, siguiendo la expansión del Universo. A pesar de ser el resultado de una simulación, así comenzó el espectáculo de lo que vemos en nuestro cielo nocturno.

Pero no adelantemos los acontecimientos. Nos movemos en el tiempo al que hemos llamado de la **gran oscuridad,** porque los fotones salidos de la recombinación tenían unas frecuencias alejadas de las que hoy conceptuamos como visibles o luminosas. El tejido espacio-temporal se estaba agrandando por efecto del empujón de la inflación. Y esto era lo más alejado a lo que pudiera ser una ayudita para la condensación de grandes masas de materia como las que observamos hoy en día. De todas formas, estas acumulaciones de materia, tanto la visible como la oscura, intentaban sujetar esta expansión gracias al efecto gravitatorio que provocaba sus masas, las cuales debían deformar fuertemente el tejido del Universo. Inicialmente conseguían muy poco, ya que el factor de expansión era muy superior al de contracción. El tejido espacio-temporal soporte se expandía en un factor **x** mientras que la gravedad, en aquellos lugares donde había materia, le recortaba una pequeña porción de esta **x**. De todas formas, lentamente, unos lugares iban diferenciando su densidad de masa con respecto a otros.

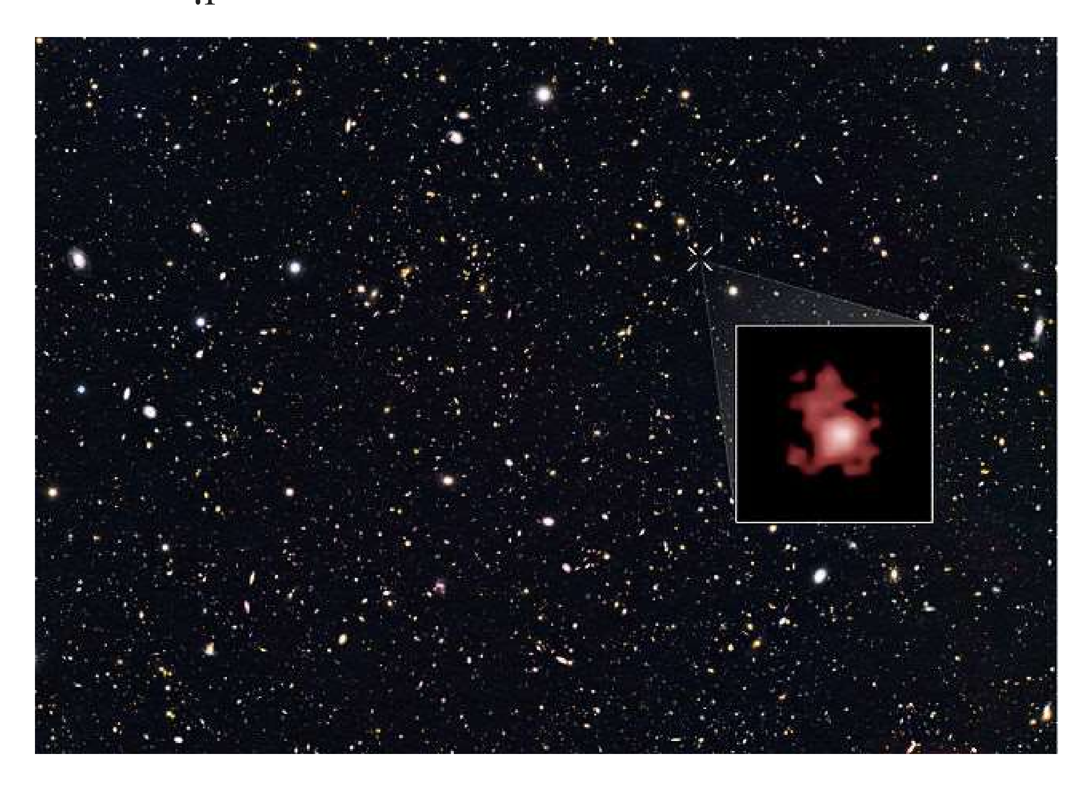
Poco a poco esas acumulaciones de materia en las zonas del Universo donde se iban produciendo, frenadas por su propio tirón gravitatorio, iban expandiéndose menos que el tejido espacio-temporal que las rodeaba. Supongamos que la expansión del espacio se estuviera produciendo siguiendo un factor temporal de escala k: cada unidad de tiempo se hace **k** veces más grande. Y supongamos también que en las zonas con mayor densidad de materia, debido a la contracción gravitatoria, el factor equivalente fuera menor, por ejemplo **k/x**. Con estas premisas en mente pongámonos a imaginar una zona cualquiera del Cosmos con una región en la que hay materia. Podremos decir que, al cabo de **una** unidad de tiempo, el volumen del Cosmos sin

materia se incrementó en $\mathbf{k^3}$, mientras que su zona con materia lo haría en $\mathbf{k^3/x^3}$. Un factor $\mathbf{1/x^3}$ menos. O lo que es exactamente lo mismo, su densidad de masa gravitatoria habría pasado a ser un $\mathbf{1/x^3}$ mayor que la de la mayoría de su entorno en el Universo ¿Eso es mucho o es poco? Pensemos en una **x** pequeña, por ejemplo 1,001. En este caso y haciendo unos sencillos cálculos, en una unidad de tiempo -la que define **k**- la zona con masa será un tres por mil más densa que la mayoría del espacio circundante.[3] La rapidez del proceso depende de la unidad de tiempo definida y del parámetro x que acompaña a la masa.

De todas formas, casi podríamos decir que los tiempos del Universo son inconmensurables para nuestra vara de medir humana. El efecto realmente importante es que en estos puntos especiales la materia iba paulatinamente aumentando su densidad. Podemos imaginar que al cabo de mucho tiempo, cientos de miles de años, la densidad de la materia se habría hecho inmensa en determinadas zonas comparada con la “densidad” de la expansión. Iban apareciendo lo que podríamos llamar unos protocúmulos de gases en donde la gravedad podía hacer valer su poder. Su principal componente era la materia oscura, de la que hemos dicho repetidamente en esta serie que representa cinco veces más masa que la bariónica.[4] Entre los componentes que formaban esta última ganaba por goleada el hidrógeno neutro: un protón con un electrón “en órbita”. Los tirones gravitatorios conjuntos fueron de tal calibre que la masa de materia se pudo desacoplar de la expansión general del Cosmos. **En el espacio habían quedado regiones de materia con libertad como para iniciar su compactación gravitatoria definitiva**. En este momento la energía oscura estaba empezando a ganarle la batalla a la expansión. Ahí comenzó la formación de la estructura del Universo.

A los 100 millones de años desde el inicio ya se podían encontrar nubes de materia oscura comprimida tan grandes como el sistema solar, con la mayor parte de su masa en el centro. Poco a poco se fueron agrupando más y más de esas nubes para formar cúmulos en los que también la mayoría de la masa estaría en su centro. Por tanto, la intensidad gravitatoria que se generaba era cada vez más potente. Se cree que estaba reforzada por agujeros negros producidos por esa

misma materia oscura, cuyas semillas habrían nacido en la época de la nucleosíntesis y que ahora se encontraban en el centro de los cúmulos. Quizás algunos de ellos forzaron la creación de los cuásares, una especie de ávidas galaxias que ya estaban activas en los primeros millones de años tras el Big Bang. El más alejado de nosotros en espacio-tiempo se trata de ULAS J1120+0641, que se encuentra a 13.000 millones de años luz, es decir, lanzaba al espacio sus ondas de radio ya a los 800 millones de años del Big Bang. Aún más antigua es la galaxia GN-z11 que lucía unos 400 millones de años antes… ¡prácticamente tras la recombinación!



¿Quieres ver algo realmente joven-joven, de hace mucho mucho tiempo? Aquí tienes a la galaxia GN-z11, que en esta imagen era prácticamente contemporánea de los fotones de la radiación de fondo (Wikimedia, NASAHubble site, dominio público)

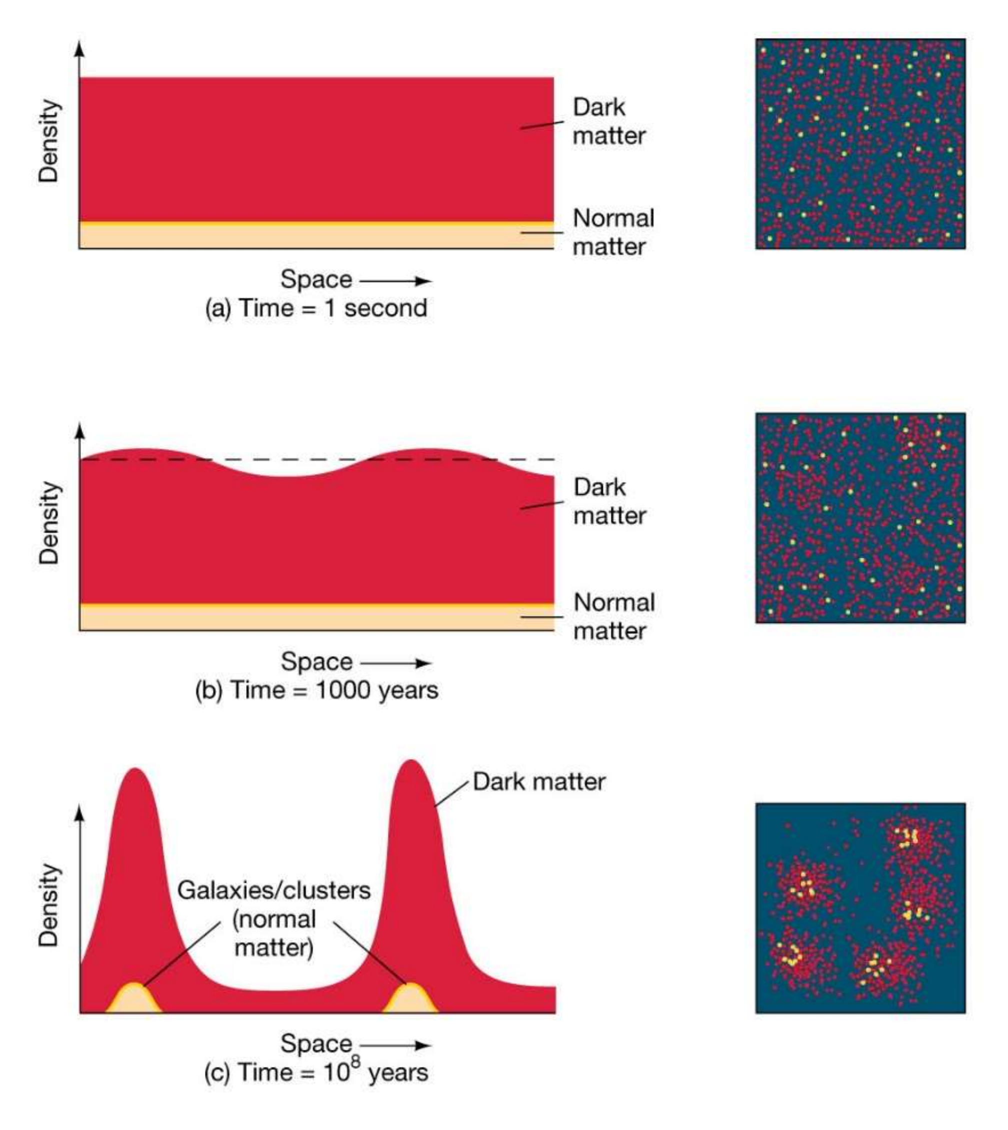
La época de la gran compactación, cuando la importancia de la expansión del tejido espacio-temporal parecía haber quedado en un segundo plano, se nos puede antojar convulsa y apocalíptica. Algo así, aunque infinitamente más dantesco, como cuando vemos avecinarse una tormenta una tarde veraniega en las grandes montañas. Pero, aunque debería haber mucha actividad en determinadas zonas, en promedio debió ser tranquilo como

corresponde a un mundo de gas con una densidad de un protón por centímetro cúbico[5], protón que formaba el núcleo de un átomo de hidrógeno con un radio en el orden de los 10^{-8} centímetros. La materia oscura no lo tendría del todo fácil. Podríamos imaginar que en el interior de los cúmulos de materia oscura más bariónica los procesos de compresión debieron ocurrir de forma homogénea en todos sus puntos. Pero en la realidad todo fue bastante diferente.

Al principio de la compactación las partículas bariónicas -básicamente átomos de hidrógeno y helio-, al ser poco masivas, se moverían comparativamente a altas velocidades. El Cosmos en aquellos momentos se encontraba bastante frío con relación a lo que había sido, unos cientos de grados Kelvin como correspondía a la energía promedio de la radiación del orden de las décimas del electronvoltio. Incluso dicha temperatura llegó a ser del orden de las pocas decenas sobre el cero absoluto. Por eso, poco a poco, la velocidad con la que se movían los átomos de hidrógeno se iría ralentizando hasta llegar a un nivel tal que hacía posible el que apareciesen rápidamente moléculas del mismo elemento por unión covalente de dos átomos.[6] Estos átomos y moléculas progresivamente se fueron enfriando y ralentizando más. Entonces, la atracción gravitatoria de la materia oscura -que al no estar sometida a la presión de la radiación se colapsaba directamente por contracción gravitatoria sin que nada lo impidiera-, conjuntamente con el empuje que se produciría en los choques con los otros tipos de partícula, haría que los bariones de la materia luminosa poco a poco fueran "cayendo" hacia los centros supermasivos de los cúmulos de materia oscura, iniciando los primeros esbozos de la estructura del Universo que vemos. Es fácil hacernos una imagen de cómo iba siendo engullida la materia bariónica por el pozo que la materia oscura había creado al deformar el tejido espacio-temporal, proceso que podemos seguir gráficamente en la imagen de más abajo.

En ella se explica la interrelación entre ambos tipos de materia y cómo el pozo gravitatorio de la oscura fue dirigiendo el proceso. Representan tres momentos en la historia del Universo. El primero, muy metido en la sopa del plasma inicial, cuando la fuerza nuclear débil entró en combate dejando a los neutrinos que camparan a sus

anchas. Era cuando rayaba el primer segundo de vida del Universo. La segunda imagen corresponde al plasma en estado "transitorio", podíamos decir. Los núcleos atómicos se habían formado y los fotones peleaban con los electrones que aún andaban independientes. Mil años tras el inicio y conformándose el patrón del horizonte sonoro. En la tercera, el Universo a los cien millones de años, en la plenitud de la época que estamos tratando en este capítulo. El factor k/x de la materia ya había hecho sus diabluras. A la derecha una imagen espacial de como andarían de revueltos materia oscura y bariones.



Representación gráfica del proceso de compactación gravitatoria inicial de la materia dirigida por la oscura. A la derecha un esquema que pretende dibujar la realidad en el espacio (Imagen del libro "Astronomy today", pag 706, Eric Chaisson y Steve McMillan, fair use)

Como el tema se alarga, vamos a sentarnos en nuestro sillón favorito contemplando a estos embriones de lo que serán cúmulos galácticos, porque en realidad la historia se complica. Saboreando la merecida cerveza sólo me queda emplazaros para el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 21:

1. Distancia en años luz y edad es equivalente. La edad la determinamos a partir de la del Universo hoy en día -unos 13.800 millones de años luz- y del corrimiento al rojo que tiene la luz de esta galaxia que detectamos. Como veremos en otro capítulo, el corrimiento al rojo, conocido como el parámetro *z*, nos indica cuán lejos de nosotros está el foco emisor de la luz. Por simple resta con la edad total del Universo sabemos cuál es la edad de la galaxia. **Edad = 13.800 – Función[z]**. En el momento de la recombinación *z* era igual a 1.100.
2. Un megaparsec, Mpc, es igual a 3,26 millones de años luz. Por lo que el horizonte acústico de hoy en día mide unos 480 millones de años luz y, como sabemos, es el patrón estándar de la dispersión de las galaxias.
3. En nuestro ejemplo supongamos que K=10. El tejido espacio-temporal en una unidad de tiempo se ha incrementado en 1000 mientras que la región con materia lo ha hecho en 997. Lo que quiere decir que la materia se ha compactado con relación a su entorno.
4. La materia bariónica es, como sabéis, la que forma las galaxias y los cúmulos luminosos que podemos observar.
5. Esta sería la presencia media de la materia en la época de la formación de las primeras galaxias, particularizada para un corrimiento al rojo de z=100. En ese momento el valor de la densidad media era inferior a la densidad de la atmósfera terrestre a nivel de mar en un factor de 10^8.
6. Las uniones químicas covalentes no son más que el resultado de que a los átomos de los elementos les chifla llegar a tener la capa más externa de electrones absolutamente rellena, para parecerse en configuración al gas noble más próximo que tengan. Así, al

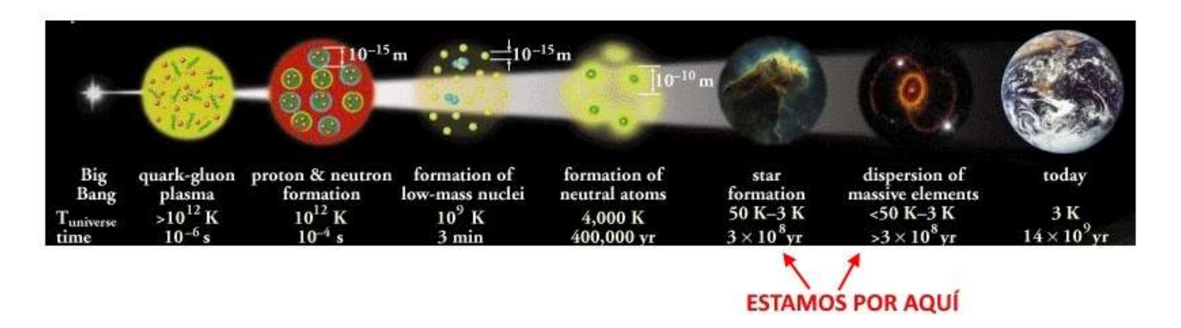
hidrógeno le apetece parecerse en sus electrones a lo que tiene el helio, es decir dos. Y para eso lo que hace es buscarse un *partenaire* con el que compartir electrones para rellenar el primer nivel. Dos hidrógenos lo harán con un oxígeno, y saldrá como consecuencia una molécula de agua, H-O-H. Dos hidrógenos se entenderán y formarán su molécula de H_2, con una energía de enlace de 4,52 eV. Imaginad su fortaleza cuando en aquellos momentos la energía promedio del Universo rondaría las centésimas de un electronvoltio. Para más detalles ver esa entrada del blog "*El Cedazo*":

[https://eltamiz.com/elcedazo/2014/11/16/quimica-organica-introduccion-2-enlaces-quimicos/]

22: De la oscuridad a la luz

200 millones de años desde el inicio

En el capítulo anterior habíamos dejado a la materia oscura haciendo su trabajo de panadero amasador de la materia. Se estaba iniciando el nacimiento de las primeras estructuras cósmicas. Habíamos asegurado que la realidad fue bastante diferente a un proceso sencillo de ir agrupando progresivamente materia, lo mismo que el polvo se apelmaza dentro de la bolsa del aspirador casero gracias al potencial de succión generado por su motor/ventilador. En el presente capítulo entramos a desentrañar alguna de las particularidades de este proceso. Y para no descentrarnos, ahí va el mapa de posicionamiento temporal.



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Para enlazar mejor con el capítulo anterior, repito aquí uno de sus últimos párrafos: "*Al principio de la compactación las partículas bariónicas -básicamente átomos de hidrógeno y helio-, al ser poco masivas, se moverían comparativamente a altas velocidades. El Cosmos en aquellos momentos se encontraba bastante frío con relación a lo que había sido, unos cientos de grados Kelvin como correspondía a la energía promedio de la radiación del orden de las décimas del electronvoltio. Incluso en algunos momentos aún menos, del orden de las pocas decenas sobre el cero absoluto. Por eso, poco a poco, la velocidad con la que se movían los átomos de hidrógeno se iría ralentizando hasta llegar a un nivel tal que hacía posible el*

que apareciesen rápidamente moléculas del mismo elemento por unión covalente de dos átomos.[1] *Estos átomos y moléculas se fueron progresivamente enfriando y ralentizando más. Entonces la atracción gravitatoria de la materia oscura -que al no estar sometida a la presión de la radiación comenzaba con sus inestabilidades gravitatorias hacia la compactación sin que nada lo impidiera-, conjuntamente con el empuje que se produciría en los choques con los otros tipos de partícula, haría que los bariones de la materia luminosa poco a poco fueran "cayendo" hacia los centros supermasivos de los cúmulos de materia oscura, iniciando los primeros esbozos de la estructura del Universo que vemos*."

El proceso que hemos explicado a grandes rasgos no debió ser tan elemental. No todo fue frenarse y caer en el pozo gravitatorio, porque todo tiene un límite. Al irse comprimiendo los grandes volúmenes de masas -gases-, los átomos y moléculas de la materia bariónica se tenían que ir acelerando dentro de un espacio cada vez más pequeño. El mayor número de colisiones consiguientes, y con una mayor energía en el choque, traía como consecuencia el que en estas zonas la temperatura aumentase, y ya sabemos que a mayor temperatura de la radiación mayor presión de tendencia expansiva dentro del gas.[2] Por todo ello podemos pensar que poco a poco se iba generando un potencial que se oponía a la compactación gravitatoria, llegándose con el tiempo a un equilibrio entre ambas fuerzas: gravedad/presión.

No creamos, sin embargo, que la compactación siguió esta sencilla regla general. En aquel "vacío"[3] amasijo de materia y radiación se daban unas circunstancias que retardaban y otras que aceleraban la congregación de las masas. Eso fue realmente importante, ya que todo ese juego de pros y contras configuraron un determinado y concreto patrón de densidades que, si no se hubiera alcanzado, no se hubiera generado este Universo tan espléndido como lo vemos ahora, con sus estructuras filamentosas y radiantes, llenas de galaxias y estrellas, cuásares y agujeros negros.

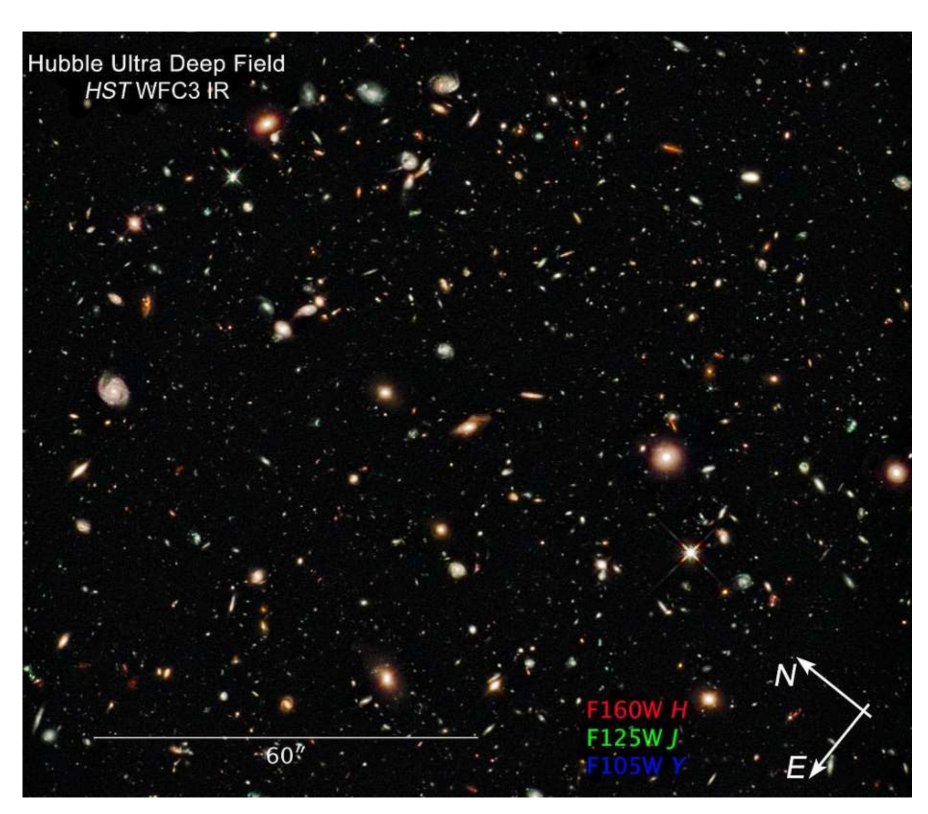
Entre las "*fuerzas del mal*" para la densificación se encontraban los *campos magnéticos cósmicos*. Este gran imán del Universo no sabemos muy bien por qué está ahí. Quizás apareció en los inicios del Big Bang como uno más de sus campos. Pero SÍ que actuaba,

aunque… ¿cómo? Forzando las trayectorias del movimiento de las partículas ionizadas que estaban intentando congregarse formando un cuerpo masivo. Y esas trayectorias, que se ajustaban a las líneas de dichos campos magnéticos, no tenían por qué coincidir con las de la "caída" gravitacional, directamente hacia el centro de masas. Debido tan sólo a eso la compactación podía ralentizarse. Pero es que, además, las partículas cargadas, al ser aceleradas por los campos magnéticos de fondo, en su movimiento chocaban con las partículas no cargadas, dificultando en una segunda derivada la compactación gravitatoria. Pero…

…otro fenómeno físico trabajaba en sentido contrario. Básicamente, lo que hacía era relajar la creciente temperatura que se iba consiguiendo al incrementarse la compactación. Si la masa comprimida por la atracción gravitatoria consiguiera no calentarse tan deprisa, entonces tendría un margen más amplio en su camino hacia mayores densidades, pues la antagónica presión de la radiación empezaría a notarse más tarde. Realmente había un "*ventilador cósmico*" que trabajaba en este sentido. Básicamente lo que hacía en las zonas de progresiva acumulación era "ventilar" energía en forma de fotones que podían abandonar el grumo de materia, con lo que así ésta seguía un camino más suave de calentamiento. ¿De dónde provenían estos fotones? En toda esta sopa, y aunque con espacios vacíos tremendos, los átomos chocarían unos con otros, con la consecuencia de que alguno de sus electrones orbitales ascendía a una capa de mayor energía. Con el tiempo -más bien poco- volvían a su querencia de un estado de menor energía: saltaban de nuevo a su órbita inferior emitiendo fotones,[4] alguno de ellos refrigerante que se perdía en el espacio lejos de la zona de conglomeración de materia.

Además, se daba otro proceso aún más eficiente, al que teóricamente en física se le conoce como "*excitación de un gas perturbado*". Tenía relación con las moléculas de la sopa gravitatoria bariónica, que en aquel momento en su mayoría era de hidrógeno. Esas moléculas estaban sometidas a estrés de movimiento en un medio compacto donde se está incrementando la temperatura, y en donde chocaban unas con otras transmitiéndose energía y alterando continuamente sus trayectorias. Algunas moléculas se salían de la disciplina que

Boltzman definió para un cuerpo negro, como lo era el cúmulo de gas. Pero obligatoriamente tenían que volver a ella, y lo hacían emitiendo fotones que aliviaban la tensión cinética. Eso era precisamente lo que pasaba con nuestras moléculas de hidrógeno, que así se travistieron en potentes refrigeradores de los protocúmulos.



Con tanta palabra, no nos olvidemos de lo que estamos hablando. Datos infrarrojos del campo profundo de Hubble tomados con la Wide Field Camera 3 (WFC3). Los colores se han asignado de forma artificial siguiendo un patrón de longitudes de onda infrarroja (Wikimedia, NASA, dominio público).

Gracias a todos estos efectos la acción gravitatoria pudo seguir consolidándose hasta estados impensables. En los primeros recorridos hacia una gravedad más potente tendremos que pensar que las nubes de gases, en aquel momento estables, se irían comprimiendo, con el resultado de que aumentaría su presión interna que aún sería capaz de sujetar a la gravedad. Por lo que durante un tiempo se iría manteniendo por sí solo un estado transitorio dinámicamente semejante al inicial, a lo largo del cual se iría acarreando cada vez una mayor masa desde los alrededores, hasta llegar a una determinada, que llamaremos crítica, tras la que se

inestabiliza, consiguiendo la gravedad vencer a las fuerzas de presión de la nube de gases, que por fin colapsará en todo su volumen. Ello será así cuando en una nube de gases su energía gravitatoria sea más grande que su energía térmica.[5]

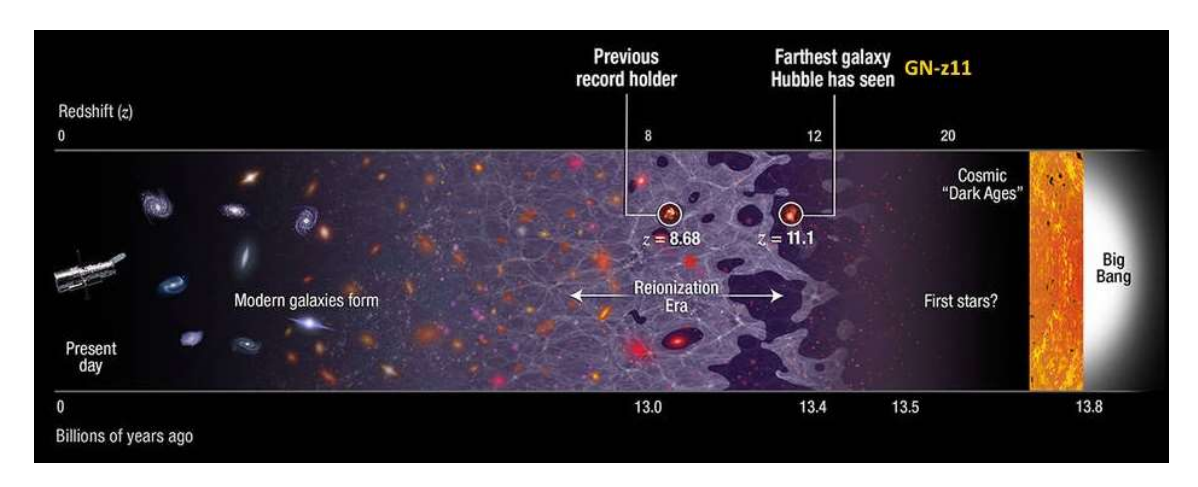
Teóricamente, el pulso entre gravedad y presión lo describe la siguiente relación que define la masa mínima ("**crítica**") que se precisa para iniciar un proceso de compresión exitoso. La calculó a principios del siglo pasado el astrónomo James H. Jeans y se conoce como la **masa de Jeans**:

La Masa crítica de la nube mantiene una proporcionalidad directa con la Temperatura e inversa con la Densidad

Lo cual es lógico, ya que cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la presión interna, y cuanto menor sea la densidad, menor será la energía gravitatoria. En el primer caso se requerirá una mayor masa para vencer la mayor presión, y en el segundo se requerirá también una mayor masa que refuerce el efecto gravitatorio. Es decir, a cualquier nube de gas sólo le hace falta ser lo suficientemente masiva y fría para que comience su colapso gravitatorio.

Además, un incremento de volumen va a favor de la gravedad ya que su energía absoluta en la nube crece con la potencia quinta del radio, mientras que la de la presión que se contrapone solamente crece con la potencia tercera del radio.[6] Al aumentar el tamaño de la nube llegará un momento en que la gravedad será la que domine. Según ello, cualquier cantidad de masa puede colapsar, ya sea grande o pequeña, venciendo a la presión, y no sólo dependiendo de la temperatura o la densidad de la nube, sino que también es decisivo cuánto de grande sea el espacio en donde se encuentra repartida. Para grandes temperaturas, la masa crítica tiene que ser muy grande. Pero podemos hacerle trampas con la densidad: si a las grandes temperaturas le confrontamos el escudo de una pequeña densidad repartida en un gran volumen, teóricamente con poca masa podemos a la larga compactar gravitatoriamente una zona del espacio sin que la presión del movimiento de las partículas del gas nos moleste. Lo que nos dice que **la casuística para el derrumbe gravitatorio es muy variada**, aunque, si miramos a las masas de gases que

observamos a nuestro alrededor, veremos que dominan las nubes moleculares a 10K y densidades de cincuenta protones por cada centímetro cúbico, las cuales teóricamente pueden tardar en colapsar hasta cien mil años cuando consigan congregar una masa doscientas veces la de nuestro sol.



Mirad a dónde nos estamos asomando (Imagen: NASA, ESA, P. Oesch y B. Robertson (University of California, Santa Cruz), y A. Feild (STScI), dominio público)

Con todo esto en mente, vamos a dar un paso más. Dentro de una gran nube de gases y polvo las densidades puntuales pueden ser resultado de sucesos aleatorios. Aunque, en realidad, en nuestra nube inicial poco polvo encontraríamos… aún era una idea del Universo para el futuro.

Los primeros efectos de la compresión se debieron notar lógicamente en las grandes nubes de materia. Aunque inicialmente tuvieran pequeñas densidades, como estaba repartida en grandes volúmenes, la gravedad comenzó a dominar. Los átomos, moléculas y todo tipo de partículas seguirían unos movimientos aleatorios, no "caerían" verticalmente hacia el centro de atracción gravitatoria como cae una piedra en la Tierra. Durante estas erráticas caídas chocarían unos con otros, se verían obstaculizados por las partículas cargadas que se movían de acuerdo a las líneas de campo del magnetismo de fondo del Universo e, incluso, las fuerzas gravitatorias tirarían de ellos de formas muy poco homogéneas… todo lo cual induciría unas trayectorias en zigzag y rotatorias, con densificaciones locales aleatorias que hacían imposible el que las fuerzas de la compresión

fueran iguales en todos los puntos. Tampoco en todos los puntos *el ventilador de fotones* actuaría con la misma intensidad, de tal manera que no todas las masas de moléculas o átomos, en sus caminos de agrupamiento, podrían ejercer parecidas resistencias a la oposición que les ejercían la presión y la temperatura.

Dentro de estas grandes masas de gas comprimiéndose, y gracias a sus particulares “ventiladores”, la temperatura se mantenía casi constante mientras que la densidad se incrementaba terriblemente, siguiendo un ritmo de la tercera potencia del factor de contracción volumétrica. Las potenciales masas críticas de Jeans en su interior iban disminuyendo. Y ya hemos dicho que no todas las zonas dentro del gran cúmulo seguían el mismo historial. Algunas de menor tamaño, distribuidas aleatoriamente en el espacio, alcanzarían antes la condición de masa de Jeans, por lo que, aquí y allá, comenzarían a verse subgrupos colapsando a su aire dentro de un núcleo gigantesco que lo hacía a su ritmo desde hacía mucho. En los pequeños núcleos, como una segunda derivada, ayudaría también en su proceso de compactación esta progresiva mayor densidad diferencial con su entorno, puesto que ello suponía un mejor blindaje frente a los rayos ultravioleta -a mayor densidad, menor penetración- que pudieran ionizar partículas en su interior. Ya sabemos que las partículas ionizadas en conjunción con los campos magnéticos de fondo dificultaban la compactación gravitatoria.

Así que inicialmente las zonas de grandes masas fueron las que antes corrieron hacia posiciones de compresión. Como consecuencia, se fueron formando los primeros cúmulos de la historia universal. Y, en su interior, los pequeños núcleos de alta masa, con la que habían conseguido la necesaria densidad para darles el diploma de poseedores de masa crítica, tenían también ventajas en el proceso: se aprovecharon de la compresión global de su entorno iniciando la suya particular. Esto explicaría el por qué un gran cúmulo de gases no se transforma en una gran estrella, sino en una familia de ellas que se comportan como un conjunto. Todo en base a un proceso autorregulado ya que las primeras estrellas en encenderse ionizaban el cúmulo de gas con los energéticos rayos ultravioleta que generaban en sus procesos internos de fusión. Eso hacía que la energía cinética

del gas disponible para nuevas estrellas fuera cada vez mayor, que es lo mismo que hacer más difícil la compactación de nuevas masas hacia nuevas estrellas. Sólo las primeras estrellas tendrían potencial gravitatorio para deglutir la masa disponible en la nube. Por lo que en cada cúmulo de gas sólo se daría a luz un número limitado de estrellas. Un ejemplo de ello lo podemos ver en la imagen siguiente, actual,[7] de la nebulosa Rosetta.



Imagen actual de la nebulosa Rosetta, a 5.200 años luz de la Tierra, cuna de unas pocas estrellas que canibalizan la materia disponible para un mayor número de ellas (Imagen: NASA, uso público)

Pero si volvemos a nuestra época cósmica, a los minicúmulos que recientemente se iban haciendo independientes dentro de la gran nube de gas, iremos observando en su desarrollo cómo la compresión llegó a densidades y presiones tan importantes que el ventilador de fotones dejó de funcionar con eficacia. La consecuencia fue que la temperatura subió, que es lo mismo que decir que la velocidad de los átomos y partículas que los formaban se incrementó. Al incrementar su temperatura y su dinámica, a la vez que estaban reduciendo su tamaño -su radio-, estas relativamente pequeñas masas de materia formadas por partículas que se movían y giraban tenían que mantener su momento angular, simplemente porque se lo ordenaba el principio

de conservación del momento angular.[8] Si disminuyes tu tamaño, tu radio, como les estaba pasando a estos “minicúmulos”, se va a producir un incremento de la velocidad de giro, por lo que cada vez giraban más y más rápido, como peonzas dentro de los cúmulos de materia oscura que las portaban. La rotación acelerada producía un viento centrífugo de partículas que chocaban con las vecinas del exterior, ejerciendo sobre ellas un influjo de ralentización en su velocidad de caída gravitacional, en su apelmazamiento hacia el centro. Era como si se fuera generando un huevo aislado en cuyo interior la presión iba en aumento mientras que en su exterior todo quedaba más relajado.

Sin embargo, la conservación del momento angular también podía ser un elemento que impidiera la compresión. El momento angular del conjunto no tenía que sobrepasar un determinado límite frontera, tras el que los movimientos iban a ser tan violentos que no se conseguiría la formación de estructuras. Tenía que aparecer algún fenómeno que disminuyera la tensión de giro. Uno de los procesos que relajarían el momento angular del conjunto sería la expulsión de grandes masas -arrastrando parte de la energía de giro- fuera del sistema. Pero fue más común, quizás por ser energéticamente más equilibrado, el mantener gran parte del momento angular dentro del sistema, siguiendo el procedimiento de que un pequeño grupo de concentraciones de masa se agrupase solidariamente -la unión hace la fuerza- contra el “enemigo”, manteniendo una dinámica de giro conjunto alrededor de un centro común de masas: estamos hablando por primera vez de lo que serían las semillas de las estrellas, que no irían apareciendo dentro de la nube de gas solitarias, sino en conjuntos de dos o más, lo cual aportaba un punto más de redistribución del momento angular al permitir la rotación de ellas alrededor de su centro de masas.

De forma que, con el tiempo, tras violentos cambios gravitatorios, los modelos de cálculo nos dicen que se deberían ir consolidando sistemas estelares en una proporción de 25 conjuntos triples por cada 65 dobles, dejando un resto de 35 estrellas solitarias como lo es nuestro Sol. Tal como lo vemos hoy.

Todos estos procesos sucedían por primera vez cuando estábamos llegando al año 150 millones desde el momento inicial del Big Bang.

Dentro de cada uno de los puntos calientes de este rosario que se produjo en el Cosmos, la gran presión y temperatura, que llegó a 10^4K, forzaron la ruptura de las moléculas de hidrógeno y helio. Más tarde, tan pronto como la temperatura alcanzó valores que lo permitieran, estos átomos se ionizaron. En esos grumos todo volvió a ser algo parecido al plasma original, la radiación ya no se escapaba y volvía a ser esclava de la materia. Estos fueron unos momentos críticos para nosotros, ya que estas circunstancias iniciaron, en lo que iban a ser las primeras estrellas, los procesos de fusión a partir de las moléculas de hidrógeno disgregadas. El Universo se abrió a la posibilidad de enriquecer su nómina de elementos químicos… ¡qué seríamos nosotros sin el calcio o el magnesio, el carbono y el oxígeno.[9] Se estaban formando las **primeras galaxias**, esas que creemos haber visto con el telescopio Hubble en los primeros cientos de millones de años tras el Big Bang. Entre ellas la que conocimos en el capítulo anterior, GN-z11. Dentro de ellas tenían que habitar unas estrellas, aún no vistas, que se las conoce como de Población III, mucho más masivas que nuestro Sol, supercalientes y que debieron tener una vida fugaz, quizás unos 4 o 5 millones de años.

Lo "breve" de su existencia se explica ya que en aquel momento prácticamente todo era hidrógeno y helio. Y sucede que a partir de gases muy ligeros, lo que suponía densidades bajas, la compactación sólo se consiguió, según nos dice el ya mencionado *equilibrio de Jeans*, cuando acabó por reunirse la masa requerida como para que por su cuantía se hubiera alcanzado el necesario poder gravitacional. Y en las estrellas, incluidas las actuales, sucede que a mayor masa comprimiendo se necesita una mayor presión para contenerla, y eso solo puede ser consecuencia de una mayor viveza en las reacciones de fusión en su interior. Y eso implica una quema de combustible muy rápida y, por tanto, vidas muy cortas.

El proceso en su conjunto debió ser espectacular. A medida que se iba compactando la nube de gas el ventilador de fotones iba haciendo su papel, cada vez con mayor intensidad al irse incrementando la temperatura de la nube que se apelmazaba. A lo largo de la larga

"caída gravitatoria" se cree que la mitad de la masa se transformó en energía calorífica que iba siendo irradiada al exterior gracias a sus mecanismos de enfriamiento, radiación que tenía que ser más intensa a medida que la masas compactada alcanzaba más y más temperatura. Durante un brevísimo instante de tiempo nuestro *proyecto de estrella* brilló con una luminosidad infrarroja superior a la de 10.000 soles. Luego llegó el momento en que comenzó la fusión nuclear, de forma que este cuerpo de gas irradió nuevos fotones mucho más energéticos. El conjunto debió de ser como un prolongado flash de luz que pasó del no visible infrarrojo a un continuo espectro luminoso… y más.

Se había encendido la luz de las estrellas y el Universo, que hasta entonces había sido oscuro, comenzó a ser un espectáculo de luz, parte de la cual se encontraba dentro de la escala de frecuencias detectables por un ojo biológico. Sí, efectivamente, entonces no había ojos, lo cual no quita ningún ápice al esplendor del momento.

Aunque a la par algo iba sucediendo. Lo veremos en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 22:

1. Las uniones químicas covalentes -para más detalles ver el enlace, propuesto al final de la nota, a una entrada del blog "*El Cedazo*"- no son más que el resultado de que a los átomos de los elementos les chifla llegar a tener la capa más externa de electrones absolutamente rellena, para parecerse en configuración al gas noble más próximo que tengan. Así, al hidrógeno le apetece parecerse en sus electrones a lo que tiene el helio, es decir, dos. Y para eso lo que hace es buscarse un partenaire con el que compartir para rellenar el primer nivel. Dos hidrógenos lo harán con un oxígeno y saldrá una molécula de agua, H-O-H. Dos hidrógenos se entenderán y formarán su molécula de H_2 con una energía de enlace de 4,52 eV. Imaginad su fortaleza cuando en aquellos momentos la energía promedio del Universo rondaría las centésimas de un electronvoltio.

[https://eltamiz.com/elcedazo/2014/11/16/quimica-organica-introduccion-2-enlaces-quimicos/]

2. Todo este lío proviene de que a las nubes de gas que se estaban comprimiendo se les podía considerar como nubes de un gas perfecto, en donde se cumpliría la ecuación de estado que relaciona presión, volumen y temperatura de una forma muy precisa, y de que normalmente la temperatura mide la energía cinética media de las partículas.
3. Comentamos ya en el capítulo anterior cómo la densidad promedio del gas era más débil que la de nuestra atmósfera terrestre a nivel del mar en un factor de 10^8.
4. Fotones que incluso podrían reforzar este mismo proceso al chocar con los electrones de los átomos del gas. Podemos pensar que lo mismo podía suceder con los fotones de la radiación de fondo salidos de la recombinación. Pero éstos, ya inicialmente "fríos", seguían su proceso de enfriamiento con sus ondas cada vez más alargadas siguiendo la expansión, por lo que no podían participar en el baile general del gas.
5. La energía térmica es proporcional a la velocidad de los átomos y moléculas dentro del sistema de gases. A mayor temperatura, mayor será la violencia entre los choques que se produzcan y mayor la presión interna generada.
6. Como podemos ver al analizar la ecuación que fija la condición con la que nos estamos manejando: que la **energía gravitacional** sea **mayor** (>) que la **energía térmica**. La ecuación es la siguiente: $\mathbf{3/5\ [GM^2/R] > 3/2\ [M/\mu m_H]\ kT}$ en donde M, R y T son respectivamente la masa, el radio y la temperatura de la nube. Y la masa, a su vez, es proporcional al cubo del radio.
7. Realmente la imagen que captamos ahora en la Tierra salió del lugar donde se situaba la nebulosa hace 5.200 años. La radiación de las estrellas jóvenes excitan los átomos de la nebulosa haciendo que emitan radiación dándole esta sensación de brillo.
8. El **principio de conservación del momento angular** dice que si el momento de las fuerzas exteriores es cero -lo que no implica que estas fuerzas sean cero-, el momento angular total se conserva, es decir, permanece constante.

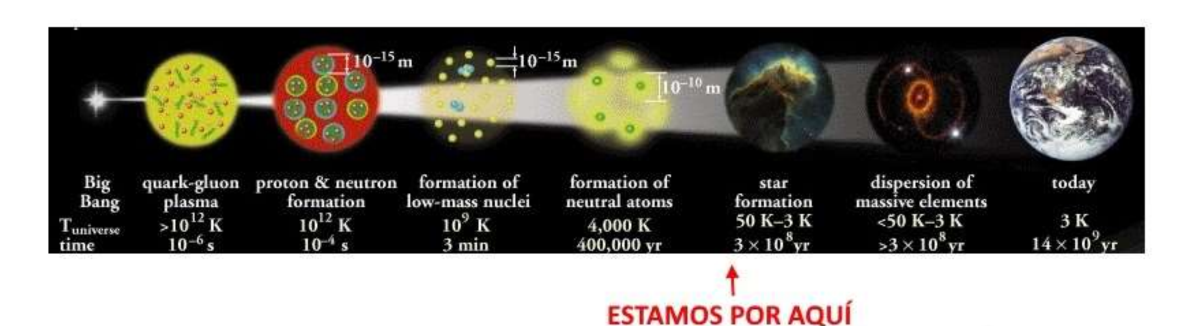
9. Si queréis saber de este misterio os recomiendo leer la entrada, de la que dejo más abajo el enlace, del blog "*El Tamiz*" que habla de ello en el contexto de las supernovas de tipo II.

[http://eltamiz.com/2007/12/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-supernovas-de-tipo-ii/]

23: Mirando en el campo profundo

millones de años desde el inicio

En el capítulo anterior estuvimos hablado de cómo la materia se iba ordenando en el mundo sombrío que dejó la recombinación. Casi toda la bariónica consistía en un gas de átomos neutros de hidrógeno y helio, tres del primero por cada uno del otro. Podemos afirmar que en los primeros momentos de aquella época el universo debía ser como un mundo de ciegos. Fue en esta tenebrosa vaciedad carente de referencias donde la materia oscura iba imponiendo su poder gravitatorio sobre la bariónica, proceso por el que esta masa se fue concentrando selectivamente, dando lugar a las primeras galaxias, incubadoras de las primeras estrellas. La más antigua conocida es GN-z11 que se encuentra en la constelación de la Osa Mayor y que ya lucía a unos 13.400 millones de años luz de nosotros, es decir, 400 tras el Big Bang.



(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

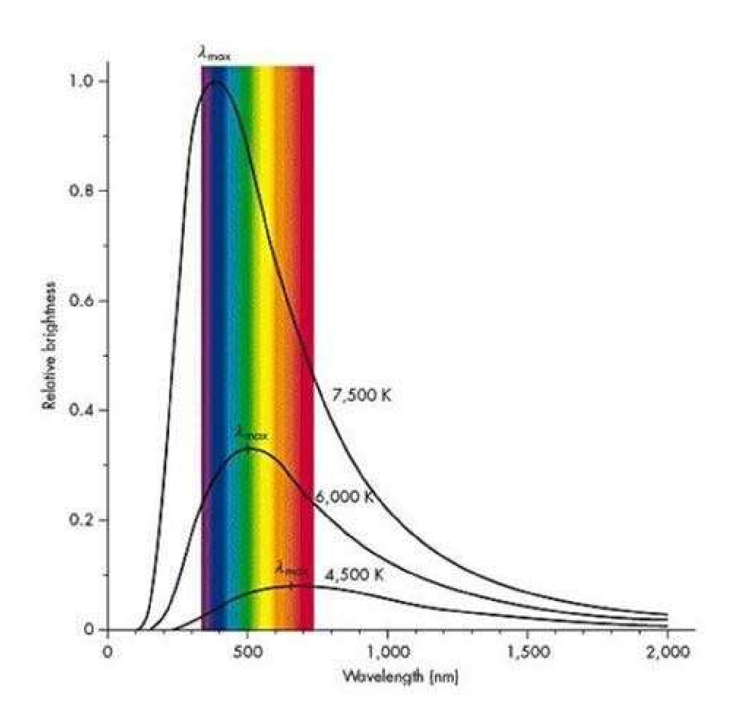
Los puntos más densos habían comenzado a sujetar el colapso gravitatorio de la masa en el que habían caído. La gran temperatura que se iba alcanzando hacía que las nubes de gases emitieran por radiación fotones en el campo infrarrojo. Poco a poco el colapso se fue desacelerando, contenido por la creciente presión, hasta que se llegó a un extremo en que los mismos procesos de presión y compactación cebaron, en lo que serían las primeras estrellas, la fusión del abundante y casi único elemento por entonces, el

hidrógeno neutro.[1] Cada dos núcleos de hidrógeno, que se transformaban tras un complejo proceso[2] en un átomo de helio, liberaban una cantidad ingente de masa en forma de energía y materia, unas partículas superenergéticas -entre otras, los fotones de radiación gamma- consecuencia de las reacciones de fusión. Así, con el fuego nuclear de estas incipientes estrellas se fue recuperando la vieja energía que nos había regalado el campo inflatón, aquella que con el paso de los años se había ido transmutando en partículas y fuerzas. Lo mismo pasa hoy en día en el interior de nuestro Sol, en donde la temperatura alcanza cotas asombrosas: casi 15×10^6K. La aburrida radiación electromagnética de fondo -menos de 1 eV- de aquel entonces se animó con nuevos vecinos, entre otros estos fotones en el espectro ultravioleta, casi rayos X, que podían arrastrar energías de más de 100 eV.

Llegado el momento del teórico encendido de las primeras estrellas, el momento de la primera luz en el Universo, voy a proponer un alto en la descripción del devenir de nuestra historia e introducir un capítulo más teórico para intentar explicar cómo nos asomamos al riquísimo océano de información que lleva incorporada. Los modelos computacionales son una de nuestras más grandes y esclarecedoras herramientas, sobre todo tras el desarrollo tecnológico que nos ha brindado capacidades de procesamiento inimaginables con los que nos acercamos a manejar la voluminosa información que encierran los procesos cósmicos. Con ellos recreamos con gran detalle lo que pudo ser, gracias a ellos casi podemos ver en nuestras pantallas y listados al Universo real y, sin lugar a dudas, nos dan una gran seguridad si lo que modelan los programas se ajusta a lo que observamos. Y observamos con la gran herramienta "histórica" de análisis de los astros del cielo, la ***espectroscopia de la luz***,[3] muy potenciada por la tecnología actual que nos permite llegar a analizar frecuencias más allá de las del campo visible. Veamos en qué consiste.

Cualquier emisor de luz -fotones- no lo hace solamente en una frecuencia, sino de acuerdo a una distribución de ellas que se ajusta a un determinado patrón. Por ejemplo, lo que llamamos *radiación de un cuerpo negro* sigue un patrón de frecuencias a la que llamamos

emisión en continuo, que dibuja una frecuencia preferida -un máximo- que depende de la temperatura del emisor. La curva siguiente refleja precisamente este fenómeno: si fuera el caso de que representara las emisiones de una estrella que tiene gran temperatura, ésta se orienta más hacia las frecuencias más próximas al azul que si es más fría, con preferencia a las frecuencias del rojo. Nuestro Sol es una de estas últimas, y su espectro se aproxima a la curva más plana. De todas formas, así emiten la luz las estrellas o el resto de cuerpos cósmicos, ya sean cuásares, galaxias o nubes de gas, que a través de sus espectros nos proponen una gran cantidad de información.

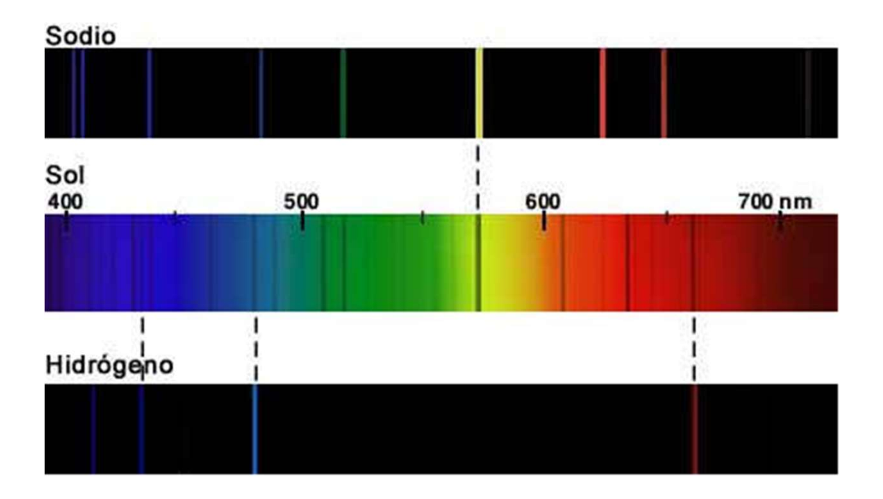


Gráfica que muestra el espectro de cuerpo negro emitido por tres cuerpos a distinta temperatura (4500K, 6000K y 7500K). El pico de la emisión, λ_{max}, ocurre a distintas longitudes de onda en función de la temperatura (Imagen de la red, fair use)

Aunque hayamos dicho que al espectro luminoso se le conoce como emisión en continuo, este proceso no es exactamente así de "continuo" en la naturaleza. La materia de cada cuerpo emisor de luz tiene una determinada composición mezcla de átomos. Cada uno de ellos tiene su particular distribución de orbitales electrónicos, cada uno con una determinada energía y no otra, puesto que está condicionada por las reglas de la cuántica. Sus electrones pueden ser excitados al interaccionar con fotones de la propia luz emitida por la

estrella, de forma que “absorben” su energía permitiéndoles dar el salto cuántico desde su nivel orbital a otro de mayor energía. Eso significa que la luz emitida por la estrella no es tan continua, sino que su espectro presentará unos huecos sin luz en aquellas frecuencias de los fotones que han sido absorbidos. Dependiendo del tipo de elementos químicos que la formen, el patrón de “huecos” será distinto. Este patrón, conocido como **espectro de absorción**, es casi el carnet de identidad de cada estrella.

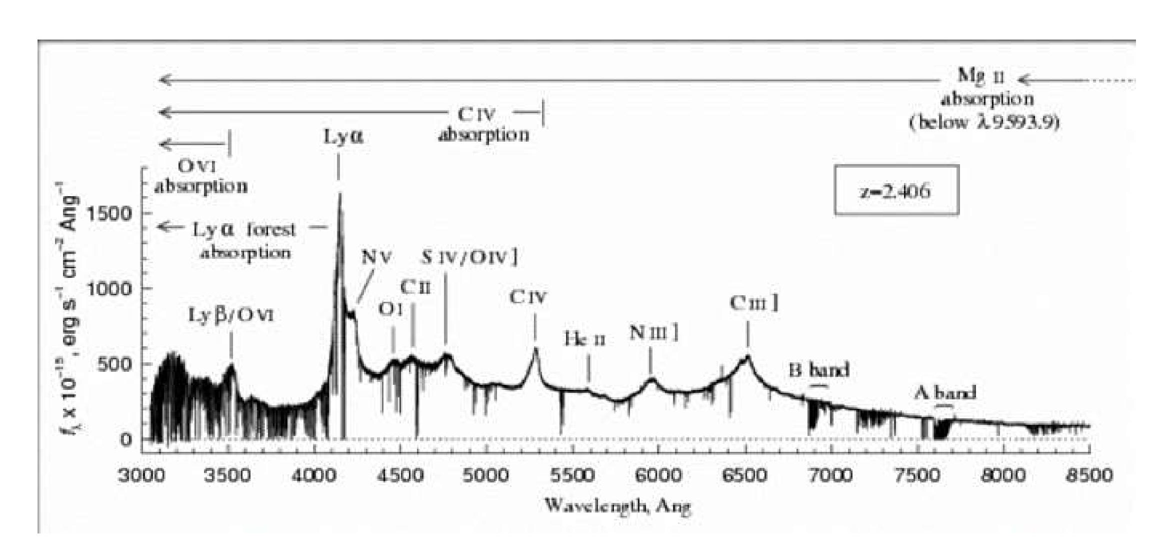
En el gráfico siguiente se ha confrontado el espectro de emisión del Sol con el de los elementos hidrógeno y sodio -elementos que se encuentran en su plasma-, los cuales presentan sus bandas luminosas en las frecuencias que definen las energías de sus orbitales electrónicos. No son bandas oscuras, ya que si estos átomos se encuentran ionizados pueden repescar a un electrón hasta llevarle a un orbital vacío de menor energía, emitiendo en cada salto de orbital un fotón que es el que dibuja la banda luminosa en su **espectro**, en este caso **de emisión**. Exactamente igual se comportan los espectros de una nebulosa, regiones del medio interestelar compuestas por masas de gas ionizado y polvo.



En esta imagen se puede ver el espectro de absorción del Sol comparado con los espectros de emisión del sodio y el hidrógeno, elementos que están en el propio Sol. Podemos ver cómo las barras características de los dos elementos coinciden con las barras negras en el Sol, como no puede ser de otra manera

Las líneas de absorción de los espectros las podemos ver en los diagramas de colores que hemos presentado aquí arriba, o bien

dibujando en vertical la intensidad de las líneas sobre un eje que representa el espectro continuo de longitudes de onda, lo que nos da otra visión del espectro, como podemos ver en la curva siguiente. Los picos serían las franjas luminosas de emisión y los pozos las negras de absorción.

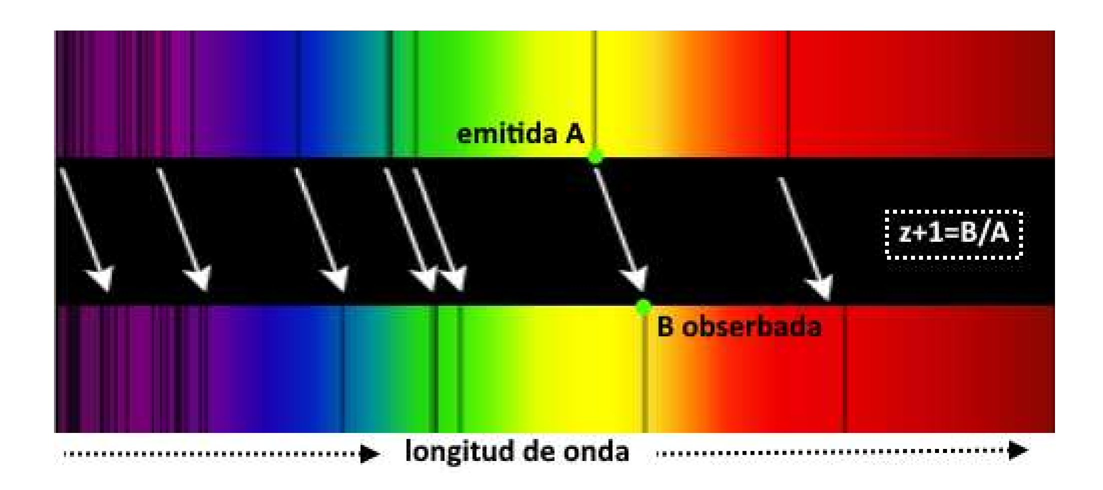


Espectro de un cuásar que se encuentra en un corrimiento al rojo de z= 2,406 (Imagen: "The Quasar Absorption Line Group" de la New Mexico State University, fair use)

Después de lo expuesto en los párrafos anteriores creo que no habrá dudas acerca de la potencia de la espectroscopia para determinar la composición de los objetos del Universo. Por otro lado, y aunque repita un poco lo dicho más arriba, quiero enfatizar también que esta técnica nos permite además conocer la temperatura de esos objetos cósmicos, lo que se consigue analizando la curva de emisión de su espectro, la cual correlaciona las frecuencias con la intensidad de cada una de ellas. Como podemos ver en la figura del inicio de este capítulo que representa el espectro de cuerpo negro para tres emisores, la forma de estas curvas dependen de la temperatura del emisor: a mayor temperatura, mayor energía y, por tanto, una frecuencia moda[4] virada hacia las frecuencia menores, hacia el azul. Igualmente podemos determinar que para temperaturas bajas la frecuencia dominante se situará en los intervalos sesgados al rojo. Con los datos del espectro podemos dibujar la curva de emisiones, lo que nos va a permitir calcular la temperatura de una lejana estrella o una nube de gas o el disco de caída de materia en un agujero negro.

No se acaban aquí las bondades que los astrónomos encuentran en la espectroscopia. Lo vamos a ver al dar un paso más en la teoría, un paso que nos va a llevar de la mano hasta otro subproducto fantástico de la espectroscopia. A partir de este momento en nuestro relato saldrá profusamente un concepto que se conoce como el "**corrimiento al rojo**".[5] No es algo misterioso o con tintes gore, o que manifieste unas determinadas preferencias ideológicas. Simplemente hace referencia a que la radiación *emitida desde más lejos* -tiempo y distancia es lo mismo- hasta llegar a nosotros los observadores, habrá tenido que recorrer *durante más tiempo* a la velocidad de la luz el tejido de un universo que se va expandiendo. Debido a esta expansión del tejido espaciotemporal que soporte la onda de los fotones, su longitud también se habrá estirado, de forma que cuanto más alejado esté el punto emisor, más amplia se habrá hecho la onda. Esto tiene su consecuencia visible cuando analizamos los espectros de frecuencia de la luz que nos viene desde un determinado punto.

Si el cuerpo está junto a nosotros el espectro coincidirá con el teórico. Por ejemplo, la longitud de onda de sus fotones azules que observamos en el espectro medido estará en el entorno de los 470 nanómetros, que es la que corresponde a este tipo de color. Si este mismo objeto luminoso que emite en esta frecuencia azul está más lejos, cuando nos lleguen sus fotones tendrán una longitud de onda mayor, su onda se habrá estirado. Particularizando para el caso de que si desde que se emitió el fotón hasta que nos llegó, el Universo se ha expandido en un factor de 10, este fotón de salida azul lo veremos como un infrarrojo.[6] Esto les pasará indistintamente a las líneas oscuras de los espectros de absorción o a las brillantes de los espectros de emisión. Y en general, a medida que el cuerpo emisor -o absorbedor- se aleja, las ondas se alargan y, por tanto, todo el espectro parece como corrido hacia el espacio de las frecuencias del rojo, con longitudes de onda más largas. Cuanto más lejos está el emisor de la luz mayor será este desplazamiento hacia la frecuencia de los rojos, circunstancia que se cuantifica mediante un parámetro denominado **z**, que es ni más ni menos que el cociente entre la cantidad de corrimiento y la longitud de onda "limpia". Lo entenderemos mejor ayudados por la imagen de más abajo.



Corrimiento al rojo de los huecos negros de un espectro de absorción. Abajo el espectro visible de un supercúmulo de galaxias distantes comparado con el de nuestro próximo sol (arriba). Las flechas indican el corrimiento al rojo experimentado por la luz del supercúmulo (Wikimedia: CC BY-SA 3.0)

El corrimiento al rojo y su parámetro z se utiliza para medir distancias en nuestro universo. A mayor z, más alejado, y a menor z, más próximo, según la siguiente relación aproximada para z's menores que 1: **D =c.z/H**, siendo D la distancia, c la velocidad de la luz y H la constante de Hubble.[7] Con el espectro determinamos z, y con z determinamos la distancia D.

Esta misma circunstancia de corrimientos de frecuencias se produce en cualquier tipo de movimiento de masas emisoras de luz, aunque es debida básicamente a otro tipo de fenómeno físico[8] conocido como efecto Doppler,[9] y que detectaremos con nuestros espectroscopios. Y todo ello nos va a permitir saber direcciones y velocidades de estos movimientos. Así, por ejemplo, podremos detectar cómo gira una galaxia espiral, ya que la luz de un extremo, supongamos que es la que emite el brazo de la galaxia que se aproxima a nosotros, estará corrida al azul, mientras que la del otro extremo de la galaxia, que se aleja, estará corrido al rojo. Y esto es aplicable de una forma general al movimiento de estrellas, galaxias, cúmulos… y otros objetos cósmicos emisores de luz.

Composiciones, temperaturas, distancias, velocidades… todo un cuerpo de conocimiento que nos ha desvelado la mayor parte de lo que sabemos de nuestro Cosmos. Pero va siendo hora de acabar.

He encabezado este capítulo como "*Mirando en el campo profundo*", aunque después de haber escrito lo que he escrito pienso que quizás realmente debería haberla llamado "*El cebado de las estrellas nos lleva de la mano a hablar de la espectrometría*". Me diréis… de acuerdo, sí, realmente esto de los espectros de la luz es algo muy curioso y valioso, nos has convencido, pero… venga, deja de dar la brasa y vamos ya a la historia del Universo. Tenéis razón, pero… y yo también aporto un pero… es que sin la espectrometría de la luz ahora mismo estaríamos en los tiempos de Newton, viendo cómo orbitan los cuerpos celestes en un cosmos que no llega más allá de la Vía Láctea. La espectrometría ha sido nuestro brazo derecho, el izquierdo y si me apuráis, también una pierna. Así que repetid conmigo ¡Viva la espectrometría y el que la inventó! ¿Newton, con su famoso prisma?

Dichas estas alharacas, ya no se puede decir más por hoy. Así que lo dejamos para el siguiente capítulo en la que hablaremos de un nuevo proceso cósmico que conocemos como **la reionización**, y de cómo se pueden utilizar las técnicas explicadas en este capítulo para buscar sus límites temporales, así como para determinar la geometría y distribución de las grandes estructuras de nebulosas, gases y polvo repartidas por el vacío del Universo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 23:

1. La fusión es el proceso por el que varios núcleos atómicos se unen y forman un núcleo más pesado. Para ello tienen que contrarrestar el rechazo electrostático que generan las cargas positivas de los dos núcleos para que pueda intervenir la fuerza nuclear fuerte y fusionarlos. Eso se puede conseguir en entornos con grandes presiones que generan altas temperaturas, las cuales son capaces de "empujar" a ambos núcleos hasta posiciones de fusión. Normalmente, para elementos menos pesado que el hierro la energía por nucleón -protón o neutrón- resultante es menor a la que tenían los de los dos núcleos antes de la fusión, y este exceso de energía es liberado en parte en forma de fotones de alta energía. Esto es lo que sucede dentro de las estrellas, donde los

sucesivos choques que experimentan estos fotones hasta conseguir situarse en la superficie del astro hace que pierdan energía. Ésta es la causa por la que en nuestro Sol detectamos fotones menos energéticos en el espectro de ultravioleta, en el visible o el infrarrojo.

2. Podéis consultarlo en el enlace de más abajo que corresponde a una entrada del blog "*El Tamiz*", una de las de la serie "*La vida privada de las estrellas*":

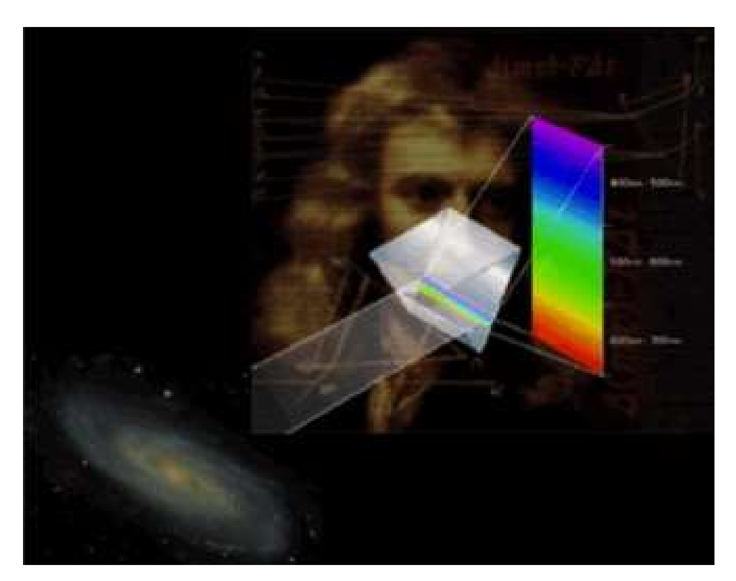
   [http://eltamiz.com/2007/09/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-las-entranas-de-una-estrella/]

3. Etimológicamente espectroscopia significa "observación del espectro". No deja de ser más que las técnicas de medida y el estudio de la luz en todo el alcance de sus posibles frecuencias.
4. En estadística la **moda** es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.
5. De hecho, ya lo hemos sacado a escena un montón de veces.
6. De acuerdo a la fórmula que relaciona longitud de onda y corrimiento al rojo, $\mathbf{z = [\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}] / \lambda_{emitida}]}$, podremos calcular la observada, que será: $\mathbf{(1+z)\ \lambda_{emitida}} = 11 \times 470 = 5.170$ nm.
7. Realmente la relación más exacta la define la siguiente ecuación, en la que se introduce un factor **q** relacionado con la aceleración de la expansión del Universo: $\mathbf{D \approx c\ [2z-(1+q).z^2]/[2H\ (1+z)]}$.
8. Hay algunos cosmólogos y astrónomos que equiparan ambos fenómenos. Mi opinión es que aunque por la expansión del Universo pudiera parecer que los cuerpos se separan, por lo que se produciría una extensión de las frecuencias en esta separación, realmente esto no sucedería si no hubiera expansión del tejido soporte, con lo que no habría corrimiento al rojo.
9. El **efecto Doppler** es el cambio de frecuencia aparente de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Aunque considero que es de sobras conocido -cómo cambia el sonido del coche de carreras que viene y nos sobrepasa- para saber más de él podéis acudir a esta entrada de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Doppler]

24: La reionización

de 300 a los 900 millones de años desde el inicio

El capítulo anterior lo habíamos dejado en el momento del inicio de los procesos de fusión en las primeras protoestrellas gracias a los que había aparecido la luz, que es la portadora de toda la información. Gracias a ella, destripada por procedimientos de espectrometría, podemos saber mucho de esas épocas. Su importancia nos obligó a pensar un poco en modo "teórico" para explicar qué es eso de los espectros luminosos.



El espíritu de Newton pilotando con su prisma la riqueza de la espectroscopia aplicada al cosmos (Imagen, fair use)

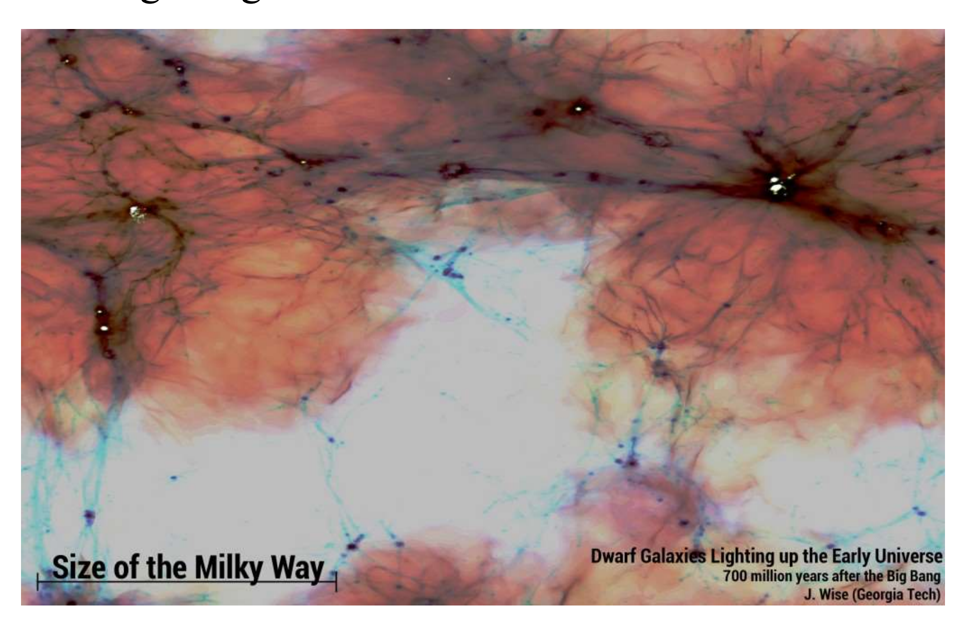
Parece que definitivamente había finalizado la edad oscura, aunque la alegría se iba haciendo esperar. Los fotones ultravioleta recién nacidos en las nuevas estrellas inicialmente se encontraban con el hidrógeno neutro que llenaba el espacio, el cual, en general, tiene la habilidad de absorber la luz de todas las longitudes de onda. Sin embargo, la mayoría de éstas son emitidas de nuevo con posterioridad a excepción de la luz ultravioleta que es absorbida por completo quedando el hidrógeno ionizado. Y eso es precisamente el caso de nuestros jóvenes fotones que tenían la energía suficiente como para desestabilizar al electrón orbital de los abundantes átomos de

hidrógeno neutro que se encontraban en las nubes de gases. No sólo les hacían subir de nivel energético en la estructura electrónica, sino que en algunos casos el choque era tan violento como para lanzar al electrón al vacío, con el resultado de que el hidrógeno quedaba ionizado de nuevo. Podríamos pensar que estos hidrógenos volvían al pasado, a un estado similar al de antes de la recombinación, aunque en un mundo mucho más amplio y menos denso, dado que el Universo se había expandido desde la edad de la recombinación por lo menos en un factor de cien.[1] El plasma resultante no fue tan denso como el que ya conocíamos de épocas anteriores y por tanto la radiación de fondo pudo seguir en libertad. Pero lo singular del momento fue que a medida que las estrellas se iban concentrando y encendiendo, es decir, a medida que los procesos de fusión iban cobrando cuerpo se iba generando a su alrededor unos crecientes espacios "esféricos" en donde el hidrógeno neutro había desaparecido para quedar iones de hidrógeno junto con los electrones libres, burbujas que se iban ampliando y fusionando hasta llenar todo el espacio.

Esto se piensa que comenzó a suceder en el entorno de trescientos millones de años después del Big Bang. Duró unos seiscientos millones de años más, seiscientos millones de años de continua expansión del espacio-tiempo, cuando el proceso de ionización se ralentizó lo suficiente debido a que las partículas se habían alejado mucho unas de otras. El hidrógeno del Universo quedó ionizado prácticamente en su totalidad, aunque siguieran quedando bolsas del elemento en su estado neutro. Y así sigue hasta el día de hoy. A esta larga fase se la conoce como la de **reionización** del hidrógeno. Por supuesto que al helio le pasó igual, también se ionizó, pero en un momento diferente de nuestra historia, lo más probable hace entre once y diez mil millones de años.

Es muy difícil estudiar directamente esta nueva época con los telescopios actuales. Las galaxias se resisten, escondidas en la niebla de la profundidad temporal del cosmos.[2] Pero podemos recurrir a modelos computacionales que intenten reproducir lo que pasaba. Uno

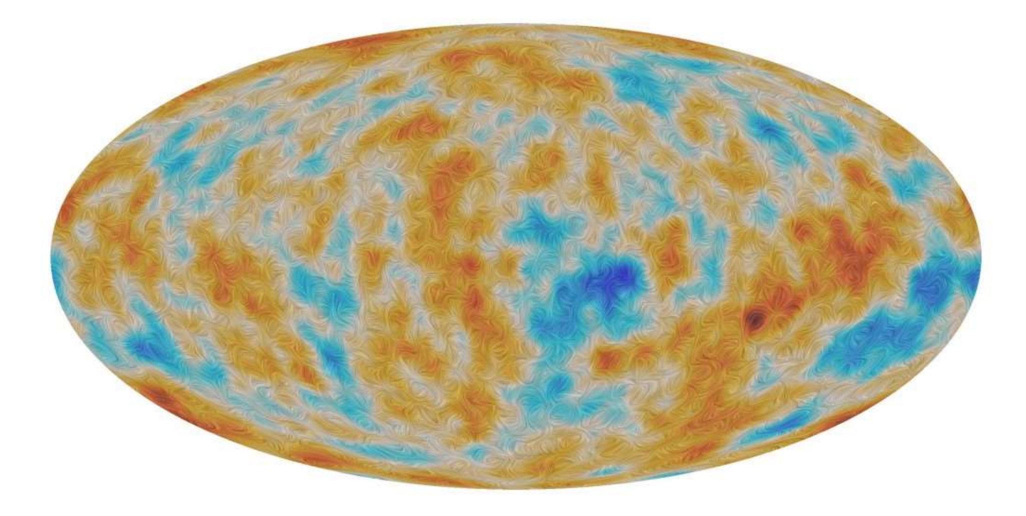
de esos estudios parece apuntar a la posibilidad de que, a pesar de la densidad de rayos ultravioleta producidos en las galaxias mayores, las galaxias pequeñas, muy numerosas, fueron las principales responsables de la reionización. En una de las simulaciones se ha podido observar cómo las galaxias más pequeñas y débiles, que contenían 1.000 veces menos estrellas y masa que la Vía Láctea y eran 30 veces más pequeñas, contribuyeron con un 30% de la radiación ultravioleta durante la reionización. La explicación está precisamente en su tamaño, que permitía a los fotones escapar con mayor facilidad al espacio intergaláctico. El proceso de reionización debió ser bastante rápido a escala temporal cosmológica, ya que se supone que a los 300 millones de años tras el Big Bang el universo estaba reionizado en un 20%. Doscientos cincuenta millones de años después pasó a estarlo en un 50 % y en su totalidad a los 860 millones de años del Big Bang.[3]



Vista del volumen completo de la simulación mencionada en el párrafo anterior del texto, mostrando la estructura a gran escala del gas, que se distribuye en filamentos y grumos. Las regiones rojas son calentadas por la luz ultravioleta proveniente de las galaxias (resaltadas en blanco) (Imagen: John Wise, Royal Astronomical Society, uso libre)

Como hemos comentado un poco más arriba, tras la reionización general del hidrógeno y helio del Universo algo nuevo había

sucedido. Los fotones que emitían las jóvenes estrellas, su luz, podían atravesar los inmensos espacios llenos ahora de hidrógeno ionizado ya que, al no tener su electrón, eran transparentes para esos fotones UV. La reionización permitió a los fotones generados en las tempranas estrellas el que la luz se transmitiera hasta los últimos confines. Ahora sí se hizo definitivamente la luz. No nos olvidemos, no obstante, el que esos nuevos fotones convivían con el mar de los que surgieron de la era de la recombinación[4] y que con la reionización también había vuelto a haber una población de electrones independientes de los núcleos, tal como sucedía en el plasma de antes de la recombinación. Al igual que entonces, los recién independizados electrones también interaccionaban con aquellos fotones del fondo siguiendo el mismo proceso físico. Las dispersiones se llevaban a cabo ahora con menor intensidad al ser las densidades más pequeñas -las partículas estaban más alejadas-, pero suficiente aún como para producir en aquellos viejos fotones de la recombinación nuevas polarizaciones resultados de esas interacciones Thomson.



Visualización de la polarización de la radiación de fondo de microondas detectada por la misión Planck. El color representa la temperatura mientras que la textura tiene que ver con la dirección de la luz polarizada (Imagen: ESA/Planck Collaboration, uso libre no comercial)

Una forma de determinar la época de la reionización es estudiando la polarización de los fotones de la radiación de fondo de microondas.

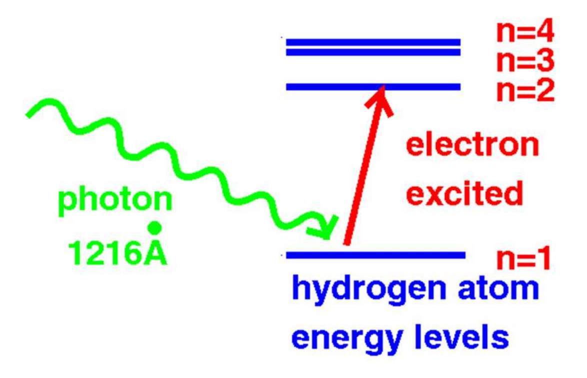
Sabemos que en el plasma inicial radiación y electrones se dispersaban mutuamente. Una de las consecuencias fue la polarización de estos fotones reminiscentes de la recombinación, que podemos observar en la imagen de la página anterior, tal como ya lo explicamos en el capítulo 19 dedicado a la radiación de fondo.

Os invito a imaginar. Desde nuestro puesto de lectura proyectemos nuestra mirada virtual hacia el infinito del Cosmos. Desde el fondo de nuestro canal de visión nos llegan los fotones polarizados de la radiación de fondo, llevan 13.400 millones de años de viaje. Pero desde nuestra posición de observadores inicialmente nos sorprende el ver unas polarizaciones diferentes a las esperadas… aunque son sólo unos instantes, ya que sabemos que tienen que estar producidas por los choques con los electrones de la reionización, que aún andan navegando en el vacío, en su largo camino hacia nosotros. Comparando el patrón de polarizaciones que observamos hoy en día con el que debió ser el inicial tras la recombinación hace 380.000 años tendremos una idea de lo que sucedió entremedias, que tuvo que ver con la población de electrones surgidos de la reionización. A partir de ello podemos determinar el número de electrones intermedios que están en la columna de gas ionizado a la que estamos mirando, "carretera" de los fotones que nos vienen desde aquel momento inicial. Como sabemos la densidad de electrones en el universo, podemos deducir la longitud de esta columna y, por tanto, el momento de la reionización. Lo que permite conjeturar que el universo comenzó a reionizarse aproximadamente en z= 11 y acabó en z=7. Duró por tanto entre 400 y 900 millones de años tras el Big Bang.

Otra forma de estudiar el mismo fenómeno pasa por analizar los espectros de los primeros cuásares contemporáneos de la reionización.[5] Sus espectros suelen ser bastante uniformes, así que cualquier alteración que observemos desde nuestra posición tiene que ser debida a algo que hay entre medias, átomos que interactúan con sus emisiones luminosas dejando su huella en los espectros en forma de un determinado patrón de líneas de absorción. Una de las

alteraciones que resultan más útiles para los cosmólogos es lo que se conoce como líneas de emisión Lyman-α. Vamos a intentar explicarlo.[6]

Pensemos que aún estamos en los momentos iniciales tras la recombinación cuando ***aún no había llegado la reionización***. El espacio estaba lleno de mucho hidrógeno y menos helio. En este mundo hidrogeniano en el que surgían las primeras estrellas, éstas comenzaron a emitir fotones en un variado espectro de frecuencias. Pero precisamente los de 121,567 nm (nanómetros: 10^{-9} metros) veían el mundo como un imposible, ya que pronto caían en las garras de los hidrógenos neutros. Y eso ¿por qué?



Esquema de la emisión Lyman-alfa que se produce al volver a decaer a n=1 el electrón excitado por el fotón, que había pasado a n=2 (Imagen, Joanne D. Cohn, Universidad de Berkeley, fair use)

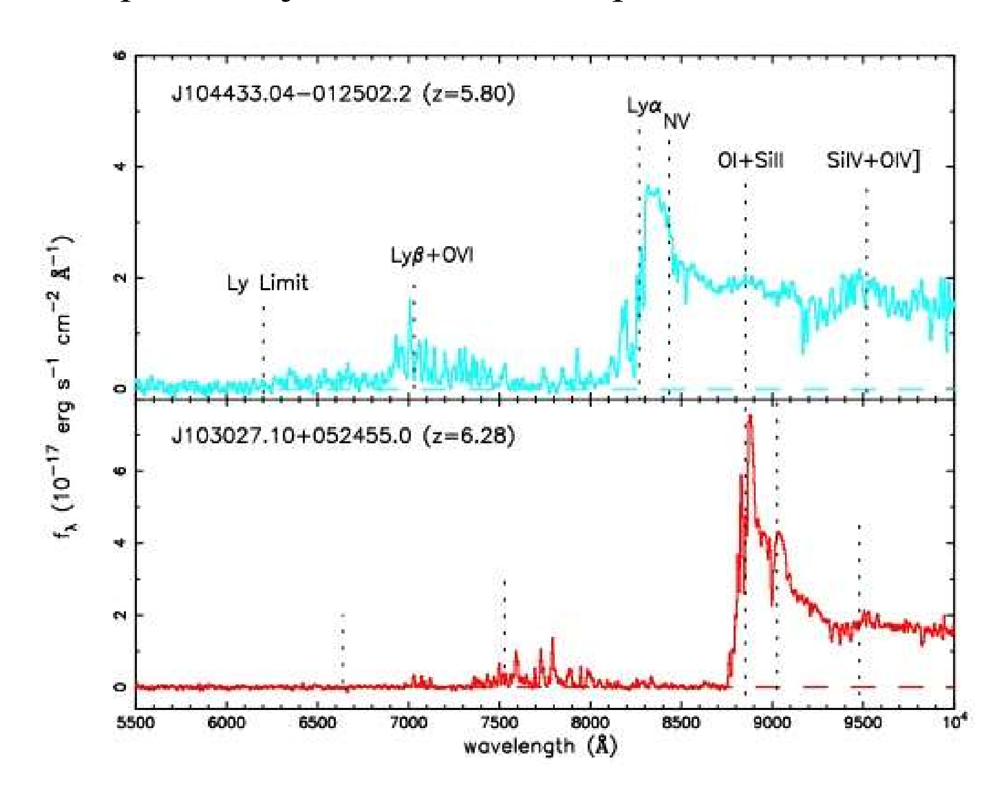
Baste saber que en el átomo de hidrógeno la diferencia de energía permitida por la cuántica entre el orbital electrónico más bajo y el siguiente es exactamente la que corresponde a una onda de esta amplitud: 121,567 nm.[7] Radiación ultravioleta. Dentro del espectro de emisión del hidrógeno se le conoce como la línea Lyman-α. Cuando los fotones de esta frecuencia salían tras los procesos de fusión nuclear de las nuevas estrellas, se encontraban con los átomos de hidrógeno neutro que los absorbían, quedando anulados para el resto del universo. Mientras hubo hidrógeno neutro el espectro de la luz de los cuásares presentaba una melladura negra, precisamente en la frecuencia de la línea Lyman-α, tanto más invisible cuanto más hidrógeno se interpusiera en su camino.

Llegó la reionización y desapareció el hidrógeno neutro ¿todo? NO. En el Cosmos incluso encontramos grandes nubes de gases en donde se ha refugiado. Y eso tiene su influencia, ya que con una pequeña cantidad de átomos de hidrógeno neutro en la población de partículas en el gas intergaláctico -incluso uno por cada 10^5 ionizados- ya se nota su efecto de absorción en el espectro de las estructuras luminosas distantes.

Las longitudes de onda **más cortas** que la Lyman-α de la luz emitida por estos objetos lejanos, al irse expandiendo el Universo mientras viajaban hacia nosotros los observadores, iban ampliándose y alcanzando en algún momento y en algún lugar el valor de la frecuencia Lyman-α. Si esto se producía en unas regiones en las que hubiera hidrógeno neutro, que tiene una capacidad tremenda de interactuar con este tipo de fotones, todas estas frecuencias quedarían fuertemente absorbidas -anuladas-. De forma que en el tramo ultravioleta del espectro de la luz de esos objetos -por ejemplo, cuásares lejanos- se va a detectar una atenuación de la luz sobre la teóricamente esperada debido a las absorciones causadas por el hidrógeno neutro. A este "desierto" de luz se le conoce como la *depresión de Gunn-Peterson*. En los espectros de los objetos luminosos lejanos que ya lucían antes de la reionización parece que debería observarse este efecto con mucha más contundencia que en los espectros más próximos de después de ella. Es más, la existencia de este "desierto" en un espectro se toma como el criterio que fija el límite final de la reionización.

Las curvas de la página siguiente corresponden al espectro real de dos cuásares. Uno de ellos -arriba- se encuentra en un corrimiento al rojo z= 5.80, mientras que el otro -abajo- está más lejos, a z=6.28. En cada uno de los dos el pico mayor corresponde a la frecuencia Lyman-α 1216 Å, y podemos observar que están muy corridos al rojo.[8] Si nos fijamos en ambos espectros en la altura de los picos que quedan a su izquierda, podemos comprobar que en el cuásar lejano prácticamente han desaparecido comparados con los del cercano. Es el efecto Gunn-Peterson que nos está diciendo: "*por aquí anda la frontera del final*

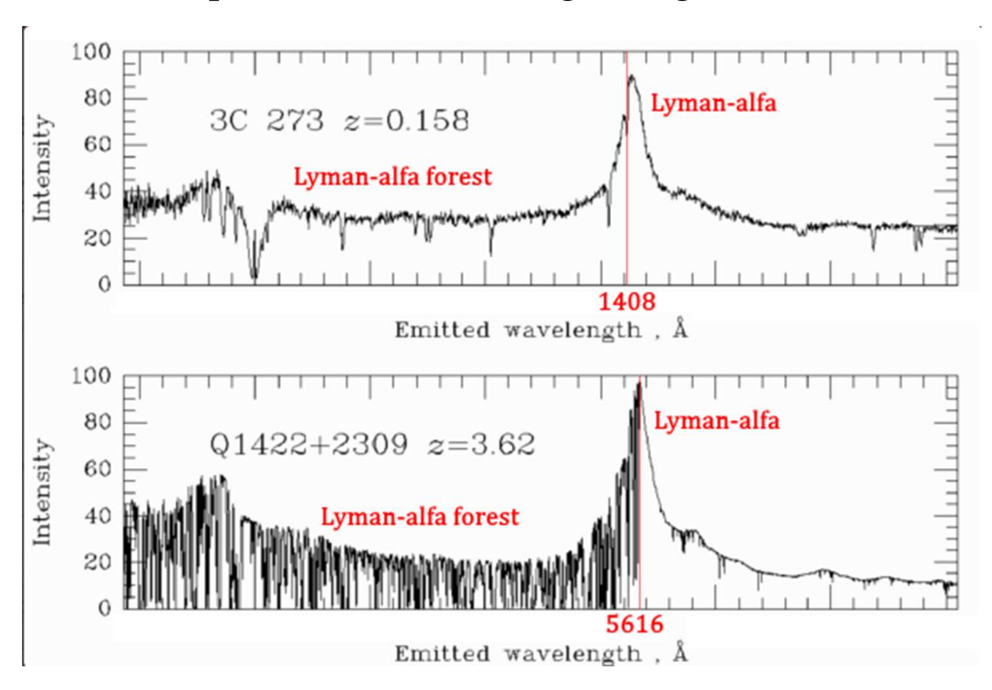
de la reionización, en z=6, cuando el universo tenía más o menos 900 millones de años de antigüedad". Si ahí acabó el proceso, los cosmólogos se atreven a postular que bien pudo comenzar cuando z=10, cuando tenía un poco menos de 400 millones de años luz. Parejo a lo que nos dijo el estudio de las polarizaciones.



Comparación de los espectros de dos cuásares, cada uno a cada lado de la frontera del fin de la reionización (Imagen: Robert H. Becker, fair use)

No quiero abandonar las excelencias de los trucos que se han inventado los cosmólogos usando la línea Lyman-α sin antes explicar de qué forma gracias a ella podemos sondear el espacio más profundo utilizando a los cuásares más lejanos. Lo hacemos con ellos por ser objetos con una tremenda intensidad de emisión de luz y además, al estar muy alejados, esa luz barre grandes distancias en el espacio-tiempo, lo que significa información de gran parte del Universo observable. En este espacio se distribuyen grandes nubes de gases en los que abunda el hidrógeno atómico. Y la luz de los cuásares en su camino hacia nuestros ojos las atraviesan. Inmediatamente tenemos que pensar que en estas regiones la magnitud de la absorción Lyman-α será importante… y así es. No es teoría… lo podemos detectar en

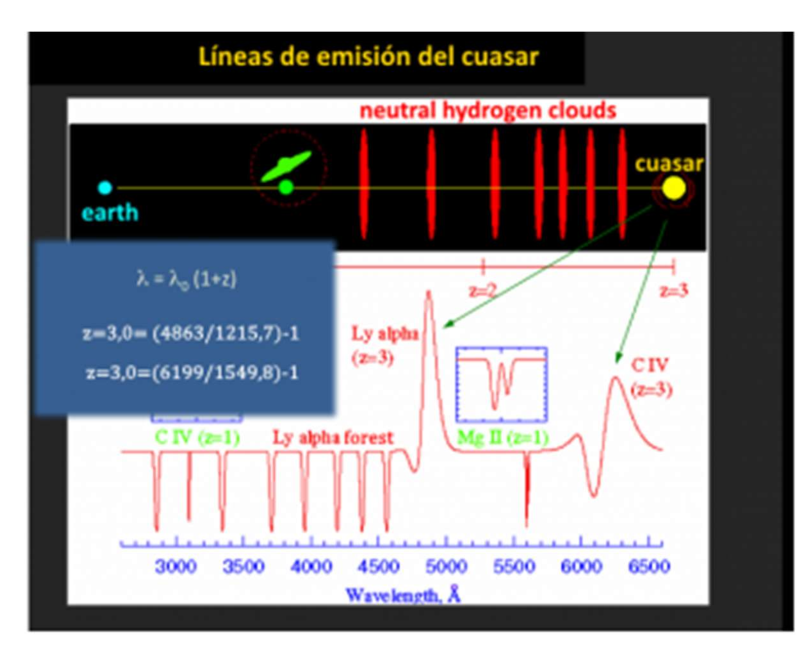
las correspondientes gráficas espectroscópicas que nos dan, al contrario de los picos positivos de emisión, unos picos negativos de absorción, como podemos ver en la figura siguiente.

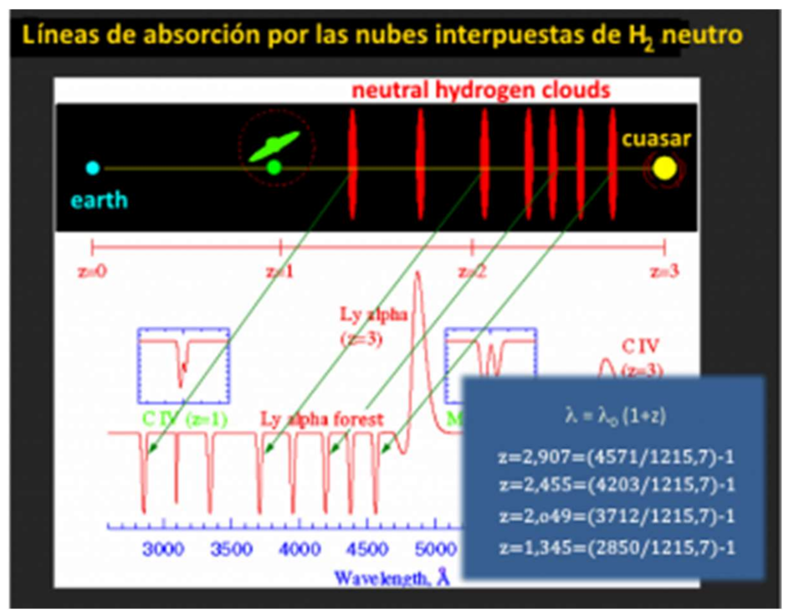


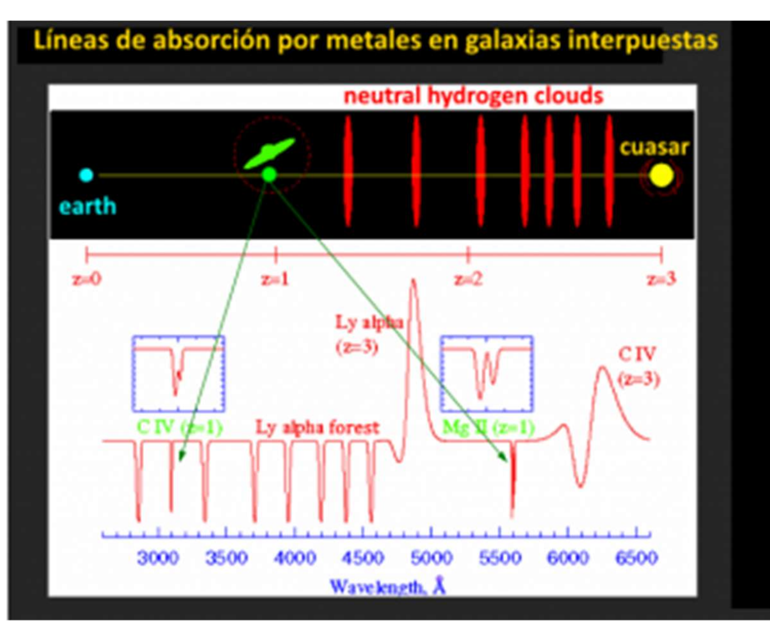
Comparación de los bosques Lyman-α en el espectro de la luz de dos cuásares, uno próximo y otro lejano (Imagen: a partir de Bill Keel, uso libre)

En ella claramente podemos ver los picos de sierra negativos de la izquierda correspondientes a las absorciones Lyman-α de la luz de los cuásares en las nubes de gas interpuestas. Generalmente, cuanto más alejado esté el cuásar, más nubes de hidrógeno neutro ha tenido que atravesar su luz antes de llegar a nuestro ojo y, por tanto, más picos negativos se ven. Al conjunto se le conoce como el "*bosque Lyman-α*". Los árboles que ocultan la luz.

Ya me parece ver cómo se os ha encendido una bombilla mental. Si cada "muesca" en la curva corresponde a la absorción Lyman causada por una nube de gas en el espacio y, además, vemos la frecuencia -corrimiento al rojo- con la que lo percibimos… tenemos una riquísima información como para hacer un mapa espacial de estas masas de gas. Y de algún cuerpo astronómico adicional que se interponga en el camino. Y así es, como podemos verlo en esta secuencia de imágenes que explicamos en el siguiente párrafo.


Líneas de emisión del cuasar
neutral hydrogen clouds
cuasar
earth
λ = λ0 (1+z)
z=3,0= (4863/1215,7)-1
z=3,0=(6199/1549,8)-1
z=2
z=3
Ly alpha
(z=3)
C IV
(z=3)
C IV (z=1)
Ly alpha forest
Mg II (z=1)
3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500
Wavelength, Å


Líneas de absorción por las nubes interpuestas de H2 neutro
neutral hydrogen clouds
cuasar
earth
z=0
z=1
z=2
z=3
Ly alpha
(z=3)
C IV
C IV (z=1)
Ly alpha forest
λ = λ0 (1+z)
z=2,907=(4571/1215,7)-1
z=2,455=(4203/1215,7)-1
z=2,049=(3712/1215,7)-1
z=1,345=(2850/1215,7)-1
3000 3500 4000 4500 5000
Wavelength, Å


Líneas de absorción por metales en galaxias interpuestas
neutral hydrogen clouds
cuasar
earth
z=0
z=1
z=2
z=3
Ly alpha
(z=3)
C IV
(z=3)
C IV (z=1)
Ly alpha forest
Mg II (z=1)
3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500
Wavelength, Å

Las tres imágenes anteriores corresponden al mismo espectro de la luz que proviene de un cuásar del fondo del universo (en amarillo a la derecha), aunque en cada una hemos particularizado un aspecto, de acuerdo a la densidad de masas de gas interpuestas o al efecto de otros cuerpos cósmicos.[9] En los recuadros en azul aparece el simple cálculo que hay que hacer para realmente determinar la distancia a la que se encuentran las nubes de gas o el cuásar, ya que el dato que obtenemos de nuestras espectroscopias es la longitud de onda de las líneas a partir de las cuales obtenemos los corrimientos al rojo. Aunque es la incógnita, en nuestro ejemplo se ha optado por dibujar el cuásar en z=3 y su luz llega hasta el observador actual (en azul a la izquierda) atravesando varias nubes de hidrógeno neutro (en rojo) a distintas z y una galaxia (en verde). El espectro que medimos es el que dibuja la curva roja. En los cuadros numéricos podemos ver el cálculo que nos dice cuánto se ha corrido al rojo la línea Lyman-α de la luz del cuásar. Así, en el cuadro de arriba medimos 4863 Å como la longitud de onda que corresponde a la Lyman-α del cuásar -es el gran pico que se ve-, corrimiento al rojo que nos permite calcular que se encuentra en z=3. A medida que la luz del cuásar va atravesando las nubes de gas de hidrógeno neutro (ver imagen del centro), éste **absorbe** los fotones de la excitación Lyman-α cuya longitud de onda aparecerá en el espectro corrida al rojo en una determinada magnitud dependiendo de la z de cada nube. Es el bosque de depresiones de la parte izquierda de la curva. Más allá hay una galaxia más joven en cuya composición hay elementos pesados que absorben también frecuencias de luz del cuásar (ver imagen de abajo). Son los pozos marcados como C IV (z=1) y Mg II (z=1) [en verde]. En resumen, la posición de picos y pozos nos están indicando el corrimiento al rojo y, en consecuencia, el lugar de las masas interpuestas y de la emisora.

Con eso damos acabada la información acerca de la reionización acontecida en los primeros años de dominio de la materia en el Universo. Lo dejamos jugando los primeros compases de definición de sus estructuras, todo un mundo en evolución que seguiremos analizando en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 24:

1. Podéis repasar la historia del denso plasma primigenio anterior a la recombinación releyendo los capítulos 15, 16 y 17 de este libro.

2. Aunque los científicos siguen en la tarea. Gracias a los datos conjuntos del telescopio Hubble y del Gran Telescopio de Canarias, utilizando técnicas de lentes gravitatorias, se ha podido descubrir y estudiar una primigenia galaxia -A370-L57- con un núcleo de estrellas en formación de una edad en el entorno de los 10 millones de años -un 0,07% de la edad del Universo- cuyos descubridores aseguran "*... sus propiedades hacen de ella una buena representante de la población de galaxias responsables de la reionización cósmica*." Lo podéis ver en el artículo de arXiv.org "*SHARDS Frontier Fields: Physical properties of a low mass Lyman-alpha emitter at z=5.75*" de Antonio Hernán-Caballero et al. (octubre 2017).

3. El estudio del que estoy haciendo referencia es "*The birth of a galaxy – III. Propelling reionization with the faintest galaxies*" de John H. Wise et al., publicado en la revista Monthly Notices de la Royal Astronomical Society, 26-junio-2014.

4. Ahora ya con unas longitudes de onda muy grandes ya que desde que se habían independizado en la recombinación -z=1.100- hasta este momento del que hablamos con una z del orden de entre 20 y 6, el universo se había expandido -y por tanto la longitud de onda de los primeros fotones- más de 1.000 veces, en plena franja de frecuencias del microondas.

5. Los cuásares son objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía. Se suponen que son agujeros negros que capturan estrellas o gas interestelar formando una especie de galaxia, proceso en el que se emite su intensa radiación. La palabra cuásar es un acrónimo de "*quasi stellar radio source*" -fuentes de radio casi estelares-.

6. Para una mayor información de las líneas espectrales y saber a qué proceso físico corresponde eso de las emisiones Lyman-α, no os perdáis la entrada "*Qué es la estructura hiperfina*" del blog hermano "*El Tamiz*":

[http://eltamiz.com/2014/10/20/que-es-estructura-hiperfina/]

7. Recordemos que ambos valores se correlacionan según Planck de acuerdo a la siguiente ecuación: $E=h/\lambda$.

8. Å es igual a 10^{-10} metros. La longitud de onda visible roja está sobre los 7000 Å.

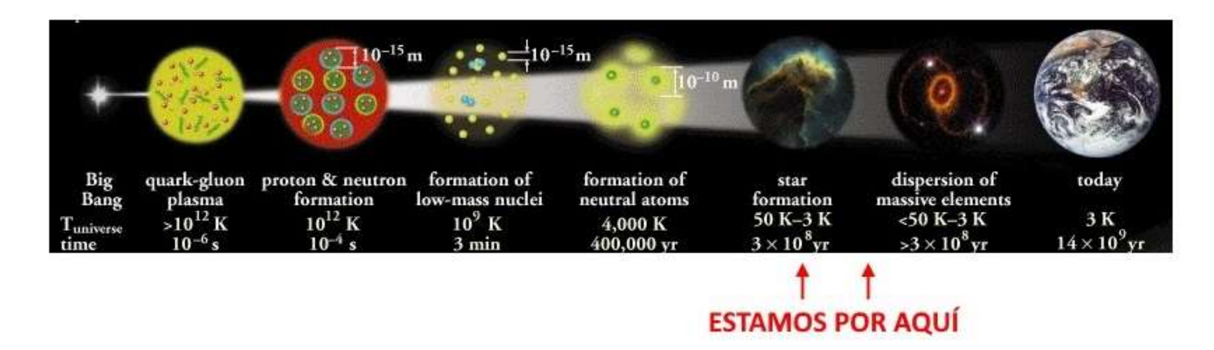
9. Las imágenes se han obtenido a partir de *"The Quasar Absorption Line Group"* de la New Mexico State University, fair use.

[http://astronomy.nmsu.edu/cwc/Group/QALsims/]

25: La época de los cuásares

de 300 a 3.000 millones de años desde el inicio

El anterior capítulo lo dedicamos al proceso de la reionización del Universo. Prefiero llamarle *proceso* más que *época*, ya que realmente fue un cambio físico "atómico" que condicionó al mundo físico "vivencial" del Cosmos. Y eso sí es parte de una biografía. De todas formas, estáis en vuestro derecho de discrepar conmigo. En el presente capítulo intentaré describir al barrio del momento y también a sus parroquianos.



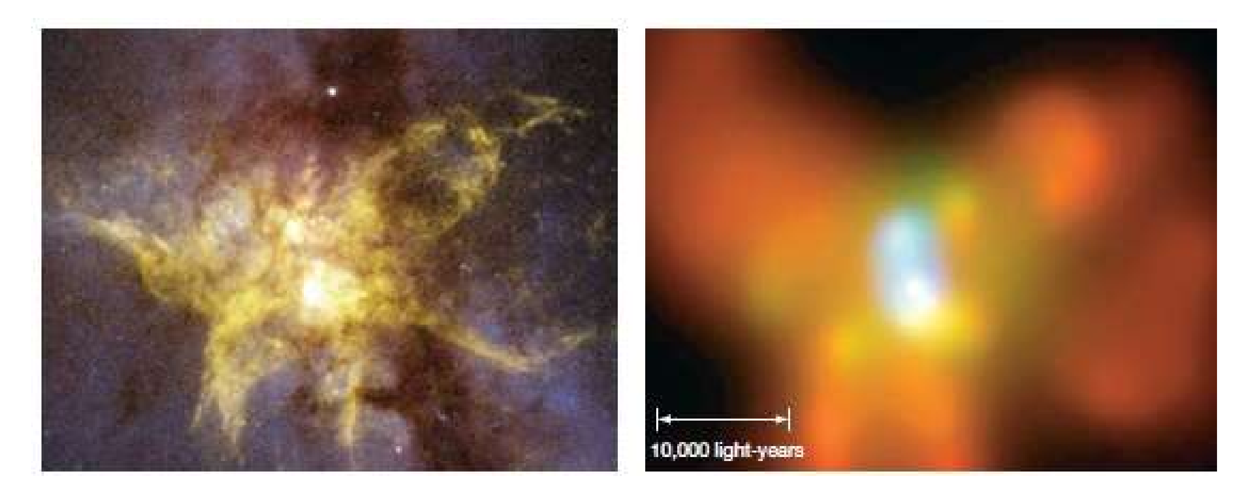
(Imagen a partir de "The Nuclear Wall Chart", Nuclear Science Division del Lawrence Berkeley National Laboratory, fair use)

Éste puede ser un avance resumen de lo que había ahí y entonces. Las masas de gas arrastradas por la materia oscura estaban colapsando y habían conseguido generar densas zonas de materia. Se empezaban a ver galaxias, muchas, pequeñas y de diversas formas, como era lógico ya que eran el resultado de los procesos azarosos que estaban ocurriendo. Grandes concentraciones en forma de agujeros negros que quizás ya venían desde la recombinación, agujeros negros que fueron motorizando a las jóvenes galaxias que, a la par de encender sus estrellas, pasaban por unas etapas juveniles, posiblemente como cuásares, para irse uniendo y modificando sus estructuras hacia formas espirales o elípticas. Todo dependía de las masas en juego y de los choques -fusiones- que se producían, choques que en aquellos

momentos de gran densidad galáctica debía haber en gran cantidad. Entre los dos y tres mil millones de años tras el inicio se llegó al punto álgido. Más allá, una vez reagrupada la materia y ensanchado el Universo, se entró en una fase más estable, lo cual no quiere decir que no se dieran los mismos procesos: se dan con menos intensidad y los estamos observando.

Sabemos que los agujeros negros tuvieron su papel en los colapsos gravitatorios iniciales con los que se iniciaron las estructuras del Universo. Y que estaban ahí antes de que se cumplieran los primeros 500 millones de años. Gracias a satélites como el Hubble, que investiga el campo profundo del Universo, y el satélite Chandra, que hace sus prospecciones en la frecuencia de los rayos X, podemos estudiar a los agujeros negros que se estaban formando en el momento que estamos analizando. Comparando las imágenes de ambos telescopios podemos concluir que la mayoría de las fuentes de rayos X detectadas corresponden a agujeros negros supermasivos. No sabemos mucho cómo se formaron, porque los que observamos están a mil millones de años tras el Big Bang y son de masas hasta cien mil veces la del Sol, por lo que sería difícil de explicarlos como colapso de alguna estrella. Hay hipótesis que dicen que se generaron directamente a partir de una reacción en cadena en grandes nubes de gas, mientras que otras afirman que los agujeros negros se generaron pasando por otros agujeros negros intermedios que, por fusión, dieron lugar a los que vemos con Hubble y Chandra. Un reciente estudio de la NASA parece decantar la primera hipótesis, sugiriendo que según las observaciones obtenidas de los observatorios mencionados -Chandra X-ray, Hubble Space Telescope y Spitzer Space Telescope- se tienen evidencias de que al menos algunos de los primeros agujeros negros se formaron directamente a partir del colapso de una nube de gas, sin pasar por estadios intermedios.[1] Pero otro estudio del Observatorio Chandra X-ray descubrió a NGC 6240, una galaxia con un agujero negro binario en proceso de fusión. Aunque es una galaxia muy cercana, los astrónomos piensan que el proceso fue similar a lo que debió suceder en los primeros momentos. Fuera como fuere, los

fenómenos que los formaron estaban ahí desde el principio jugando un papel fundamental en lo que estaba sucediendo.



Pistas de un agujero negro binario en la galaxia NGC 6240. A la izquierda, lo detectado por el Hubble en el rango de las frecuencias visibles, y a la derecha lo detectado por Chandra en el rango de los rayos X (Imagen: "NASA/CXC/SAO", uso libre no comercial)

Normalmente estos agujeros negros se encontraban en el centro de galaxias o de cuásares, absorbiendo la materia que se ponía a su alcance y siendo el motor del giro de estas grandes estructuras cósmicas. De forma que casi está establecida la regla de que cada galaxia brillante, ya sea de las activas o no,[2] contienen un agujero negro central supermasivo. Los cuásares son unos objetos normalmente muy lejanos que emiten energía en frecuencia de radio.[3] Hasta hace poco no se sabía que llevan asociados una galaxia, por lo que se cree que constituyen una fase de juventud en la generación de esas estructuras, por lo que su estudio nos puede dar muchas pistas sobre la formación de las galaxias. La dificultad de ver la galaxia asociada al cuásar era debido a su lejanía y, por tanto, a que la sutileza de la luz de la galaxia hacía que apareciera velada por la más intensa emisión del cuásar. Sin embargo, los modernos telescopios permiten recibir la luz en una variada escala de frecuencias y los modernos equipos de estudio de esta luz permiten filtrarla, de forma que al eliminar la luz de los cuásares aparece la lejana galaxia.

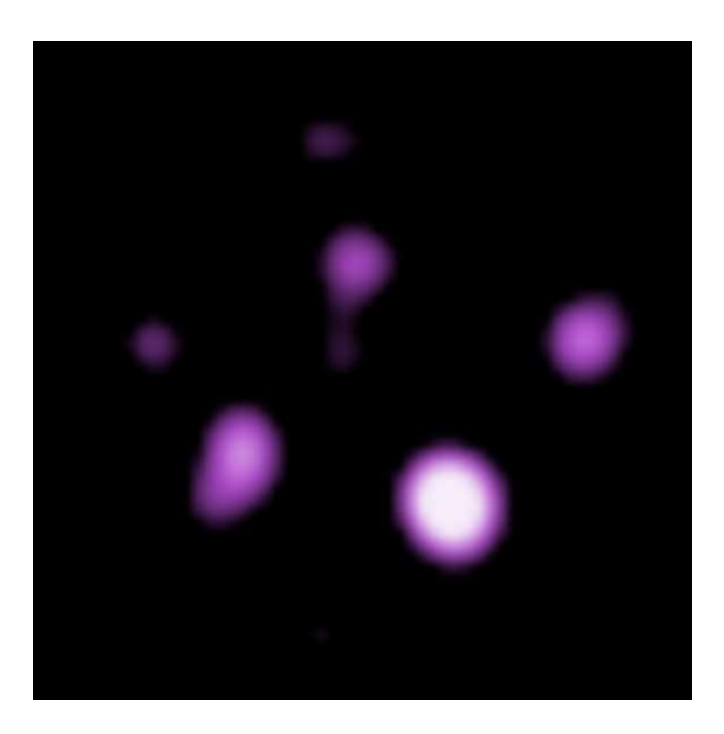


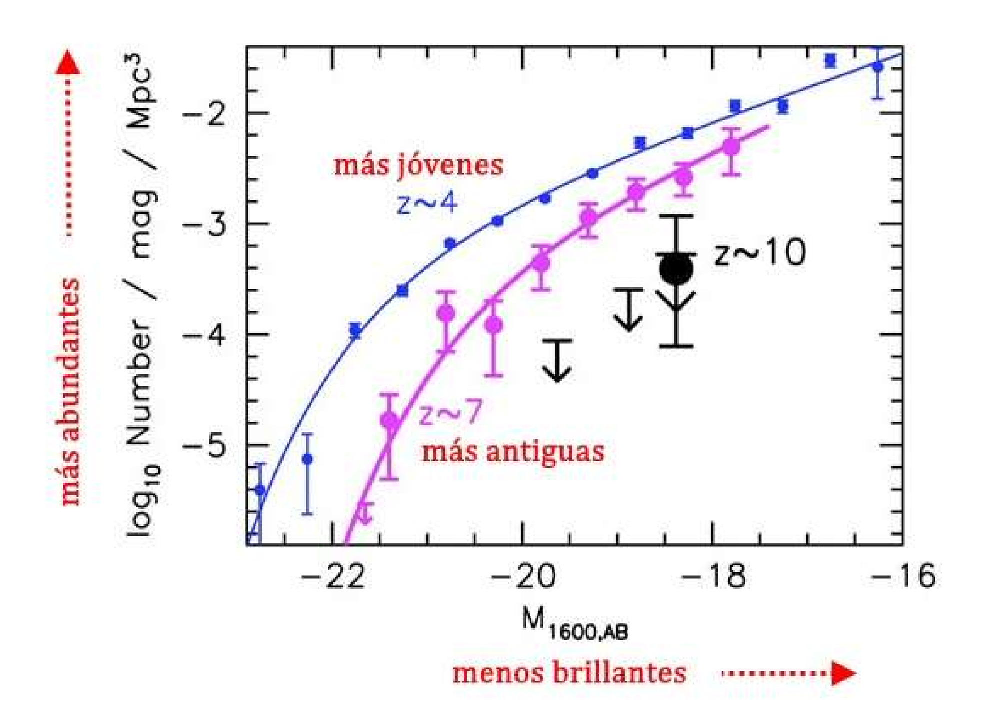
Imagen del cuásar H 1413 + 117 obtenida por el telescopio en rayos X Chandra. Aparece cuatro imágenes por efecto de lente gravitatoria producida por alguna masa interpuesta entre el cuásar y nosotros. Se encuentra en un corrimiento al rojo de z=2,56, más o menos a unos 2.700 millones de años tras el Big Bang (Imagen: NASA/CXC/Penn State/G.Chartas et al, uso libre no comercial)

De hecho, gracias a estas tecnologías se están observando más cuásares a grandes distancias -sobre todo entre mil y tres mil millones de años tras el Big Bang- lo que demuestra que eran mucho más numerosos en los inicios que hoy, cuando las primeras galaxias se estaban formando en grandes cantidades, lo que ha hecho que algunos hayan designado a esta fase como la **época de los cuásares**. Quizás esta transitoriedad de la época cuásar es debida a que para que se "ceben" e inicien y mantengan su actividad se requiere un agujero negro inicial y materia abundante para que impulse la rotación en su caída hacia dicho agujero. Pero las cantidades de materia necesarias para fijar su actividad es tal que los cuásares sólo pueden brillar durante un corto espacio de tiempo, unos pocos millones de años. Para que durasen más se debía tener un "motor" más potente, tenían que unirse algunos agujeros negros para generar un suficiente

potencial como para acumular la suficiente materia y cebar así al cuásar. Quizás eso sucediera por fusión dentro de una galaxia joven de varios agujeros negros pequeños que quedaron en su centro. La época de los cuásares comenzó más o menos en un corrimiento al rojo de $z=6/7$, es decir, a los 800 millones de años tras el Big Bang, aunque tuvo su momento álgido, debido a los comentados procesos más complejos que comportaban la fusión de varios agujeros negros, dos millones de años más tarde.

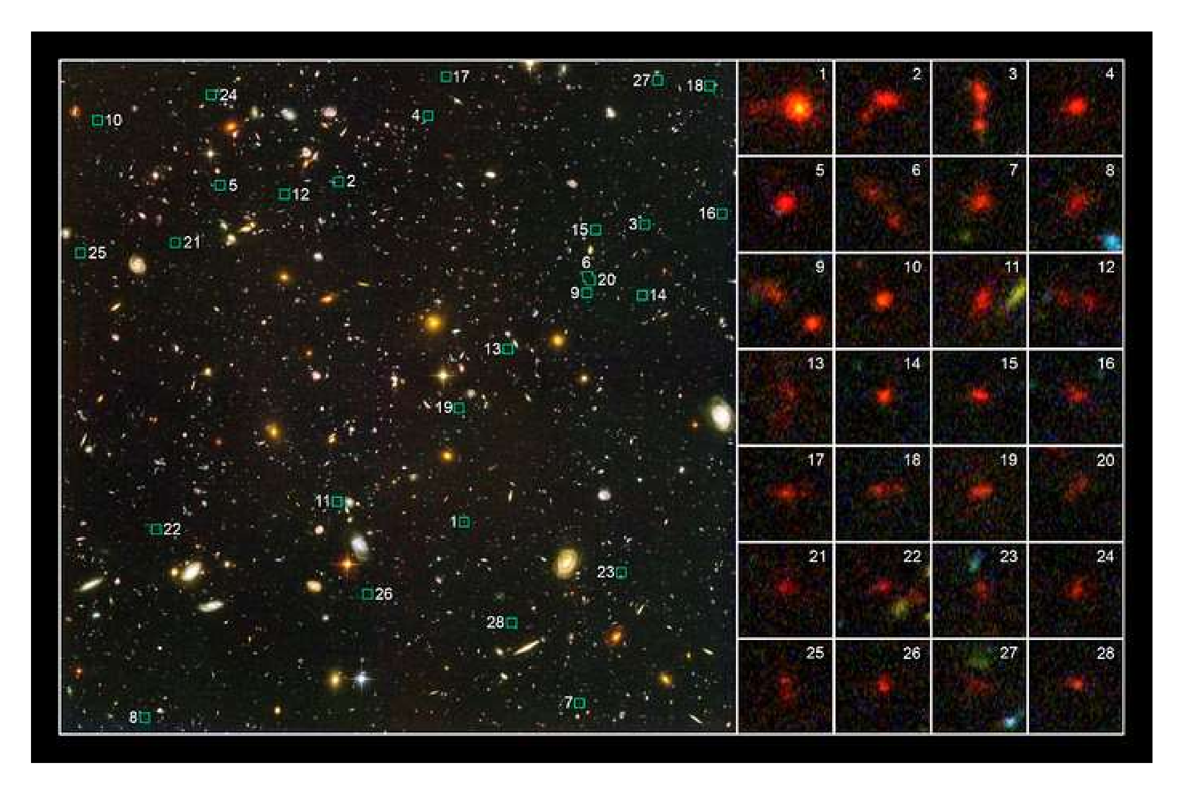
De las masas de gases a los agujeros negros, y de ellos a los cuásares para llegar a las galaxias. Hasta donde sabemos, el perfil de nacimiento de las galaxias y sus características es bastante claro. Se cree que hubo *diez veces más galaxias por unidad de volumen al inicio que las observadas ahora*.[4] Además de abundantes, estudiando la nómina de galaxias conocidas de una edad próxima a los mil millones de años vemos que en promedio eran *mucho más pequeñas y de mayor luminosidad por unidad de masa -en la frecuencia de los azules* como corresponde a sus jóvenes estrellas- que las galaxias actuales. También sabemos que durante los dos mil primeros millones de años, las que se fueron formando contaban con *un número muy pequeño de estrellas*. A partir de estas estructuras, como si ya se hubiera acabado la materia prima a depredar, por fusión entre ellas se llegó más tarde a las grandes galaxias que vemos hoy. Aunque algunas de pequeño tamaño se escaparon de estos procesos de fusión y canibalismo y aún podemos observarlas hoy en día.

Si estudiamos la función de luminosidad, es decir, la densidad de las fuentes luminosas -las estrellas- en función de esta luminosidad, podremos obtener datos precisos de cómo cambió la población de las galaxias a lo largo del tiempo. Los astrónomos han hecho este análisis en el intervalo $4<z<10$ -reflejado en la figura de la página siguiente-. En ella, el eje vertical indica la distribución de la población, mientras que en el horizontal se trazan las luminosidades. Cuanto más negativo sea más brillante es la galaxia. Y como el eje vertical está representado en unidades logarítmicas, cuanto más negativo sea el número, menor es su abundancia.



Curva que correlaciona en el eje vertical la densidad volumétrica de las galaxias con su luminosidad en el eje horizontal (Imagen: Bouwens, CC BY 3.0 US)

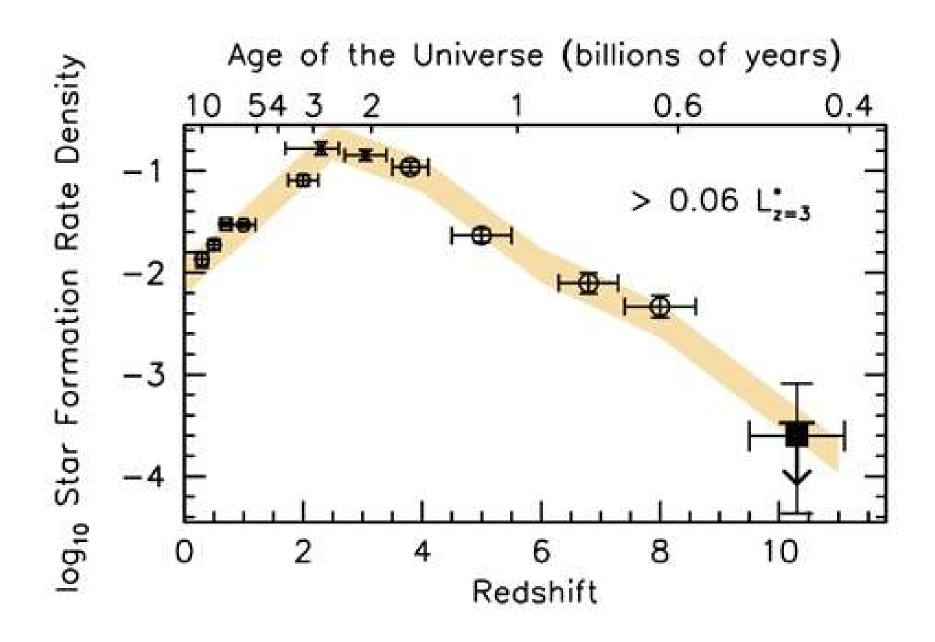
Dicho esto, la conclusión es que para cualquier época las menos luminosas eran más abundantes que las más luminosas y que a altas z -las más antiguas- las galaxias eran menos luminosas que las que existieron más tarde. Lo cual no nos sorprende, ya que era de esperar que las galaxias más brillantes fueran la consecuencia de la fusión de galaxias menos brillantes y más pequeñas. Esto es coherente con lo que piensan los astrónomos, que establecen la existencia de una *jerarquía de fusiones de galaxias* en el proceso de su desarrollo.[5] Al igual que las que vemos hoy en día, en su mayoría tendrían que encontrarse dentro de cúmulos de galaxias, por lo que en aquellos momentos era bastante probable todo tipo de interferencias y colisiones. Esto no sólo afecta a sus formas, sino también al proceso de generación interno de estrellas y de emisiones desde el núcleo central. Los estudios de estas características -generación de estrellas y emisiones- indican que las interacciones entre galaxias se dieron con más intensidad hace mucho (para z mayores de 1), la mayoría, en la proximidad de hace unos diez mil millones de años -3.800 millones tras el inicio-.



A la izquierda, parte del campo profundo del universo fotografiado por el satélite Hubble, en donde observamos evidencias "fósiles" de cientos de galaxias a menos de mil millones de años tras el Big Bang. A la izquierda hay una ampliación de alguna de ellas, más bien cúmulos de miles de millones de estrellas muy próximas, auténticas protogalaxias dispuestas a entrar en procesos de fusión entre ellas. Aparecen de color rojo dada su lejanía y consiguiente corrimiento al rojo de la luz de sus estrellas (Imágen: NASA, CC BY 4.0)

Pero ¿qué sucedía dentro de estas galaxias? Ya sabemos que en las nubes de gases del universo se iban condensando cúmulos con mayor densidad de materia, algunos de ellos con las condiciones precisas para encender la fusión nuclear en su interior y alumbrar así el nacimiento de una estrella. Hoy en día aún podemos ver cómo sucede este proceso en lugares como la "incubadora" de la nebulosa de Orión, en donde unas familias de estrellas brillantes cohabitan con su materia prima de gases todavía muy próxima a ellas. Creemos que en los primeros millones de años del universo el proceso de creación de estrellas en una galaxia pudo seguir un proceso cíclico: una nube de gases se fusiona, aparecen estrellas jóvenes, su radiación muy

energética dispersa a la nube asociada en unos diez millones de años. Estos vientos estelares, conjuntamente con ondas de choque generadas en la explosión de supernovas, comprimen una nueva nube de gases… y vuelta a empezar.



Densidad de la tasa de formación de estrellas en función de la edad del Universo (Imagen: Bouwens, CC BY 3.0 US)

En la figura anterior se ha dibujado la intensidad de formación de estrellas en función de la edad del Universo. Vemos cómo la curva se incrementa rápidamente desde z altas (*Redshift* en la imagen), gran antigüedad, hasta alcanzar un pico cuando el universo tenía entre dos y tres mil millones de años, para luego ralentizar el ritmo de generación estelar.

Con esto damos por acabada la información de los primeros años de dominio de la materia en el Universo. La materia oscura, que se había posicionado ya desde antes de la recombinación, rápidamente había tomado el mando. Su tirón gravitatorio se tuvo que sentir desde los primeros instantes, ya que observamos cómo aparecen muy pronto las primeras galaxias con sus jóvenes estrellas de población III emitiendo, como era propio de su juventud, energéticos rayos ultravioleta. Se cree que las semillas de este veloz proceso debieron ser los agujeros negros generados por el colapso gravitatorio de las

masas de materia oscura, agujeros negros que generaron los antiguos cuásares cuando la materia bariónica ordinaria, cada vez más fría, se frenó lo suficiente como para iniciar su "caída" hacia esos boquetes del universo. Los cuásares se iban alimentando de los bariones más próximos, permitiendo al resto de su población seguir con sus procesos particulares de compactación que ya explicamos en capítulos anteriores -desde la 20 a la anterior-. Se fueron generaron cúmulos pequeños y galaxias de tamaño de los pocos miles de años luz, estructuras que se iban sumando generando a su vez otras mayores y más rutilantes. En el entorno de los dos o tres mil millones de años desde el Big Bang la familia empezó a estabilizarse, entrando en el régimen "normal" de nuestros días. Tenemos ya estrellas, galaxias y cúmulos. Agujeros negros y cuásares.[6] Ahora bien, no obstante la estabilidad alcanzada, tenemos un mundo en evolución que seguiremos analizando en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 25:

1. Podéis verlo en la reseña publicada por la NASA o con más detalle en este pdf del trabajo del equipo investigador.

   [https://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescopes-find-clues-for-how-giant-black-holes-formed-so-quickly]

   [https://arxiv.org/pdf/1603.08522.pdf]

2. **Galaxia activa** (extraído de la web de la Sociedad española de Astronomía): "*Galaxia de luminosidad excepcionalmente alta y variable que muestra signos de la existencia de procesos muy energéticos relacionados con su zona central o núcleo. El brillo de este pequeño núcleo, que se manifiesta en todas las frecuencias desde ondas de radio a rayos gamma, sobrepasando el del resto de la galaxia, implica la existencia tanto de un enorme calentamiento térmico (temperaturas de millones de grados) como de un potentísimo acelerador de partículas. El origen de estos procesos es la caída de materia hacia un agujero negro*

supermasivo en el centro de la galaxia. Galaxias Seyfert, cuásares, radiogalaxias o blázares son distintos tipos de galaxias activas.”

3. Los **cuásares** son objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía. Se supone que son agujeros negros que capturan estrellas o gas interestelar, formando una especie de galaxia, proceso en el que se emite su intensa radiación. La palabra cuásar es un acrónimo de “*quasi stellar radio source*” -fuentes de radio casi estelares-.

4. En el artículo “*The evolution of galaxy number density at z < 8 and its implications*”, publicado en la revista *The Astrophysical Journa*l en octubre de 2016 se estima que en la edad correspondiente a un corrimiento al rojo de Z=8, 700 años tras el Big Bang, el número total de galaxias sería de dos billones – 2×10^{12} -, una población mayor en un factor de 10 comparada con la población de 10^{11} de ahora. El menor número lo podemos atribuir a que se ha vivido un continuo proceso de fusión de galaxias. Pero impresiona la disminución en la densidad ya que para Z=8 el universo era ocho veces menor que ahora, por lo que desde entonces el volumen se ha incrementado más de 500 veces -8^3=512- y, en consecuencia, la densidad en número de galaxias, teniendo en cuenta el factor de 10 de menos abundancia en la población actual, ha disminuido en más de 5.000.

5. Para ver más acerca de los procesos de formación de las galaxias podéis acudir a este artículo de Wikipedia:

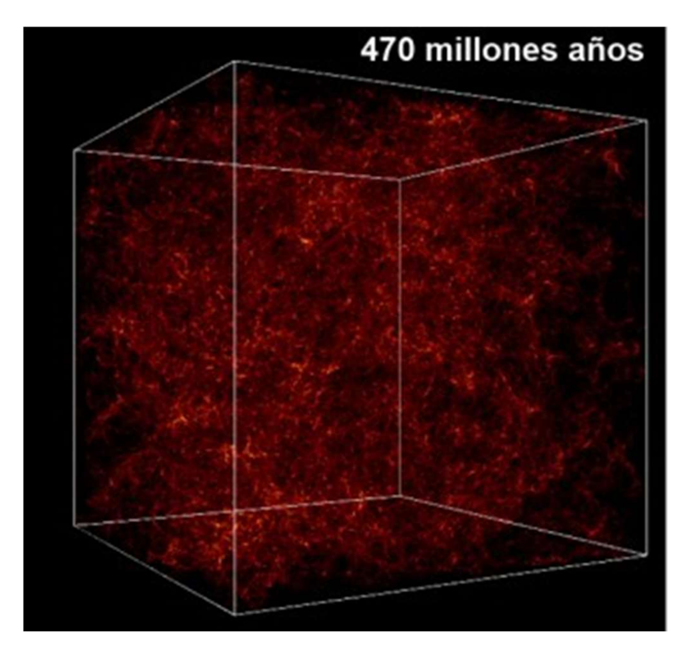
   [https://es.wikipedia.org/wiki/Formaci%C3%B3n_y_evoluci%C3%B3n_de_las_galaxias]

6. En este enlace podéis encontrar un listado de los objetos astronómicos más lejanos:

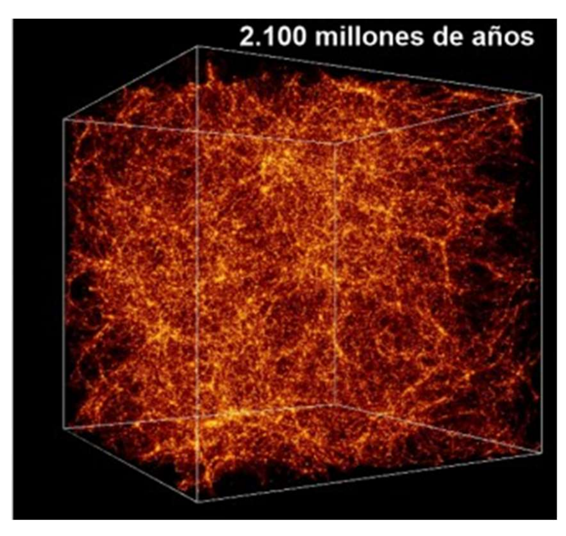
   [https://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_the_most_distant_astronomical_objects]

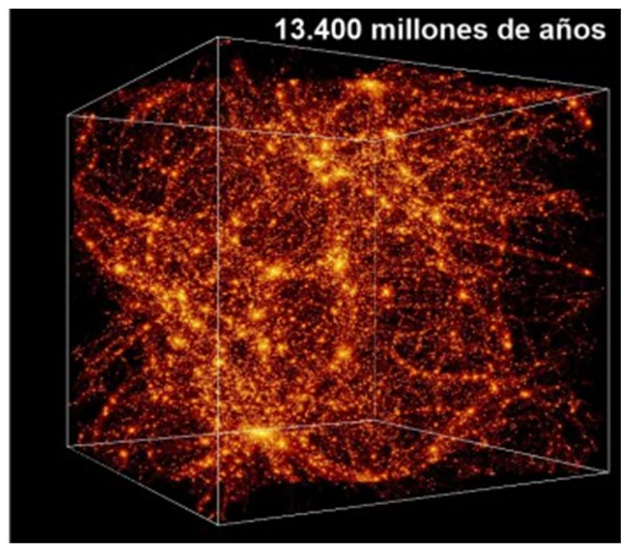
26: Una pausa en nuestra historia: el Universo a vista de pájaro.

El capítulo anterior había cerrado con un universo lleno de agujeros negros, cúmulos, cuásares, galaxias y estrellas. La máquina estaba ya en régimen de crucero, sólo tenía que seguir rodando. Quizás éste sea un buen momento para hacer un alto en el camino, elevar el *zoom* y disfrutar viendo desde las alturas el "bosque" del Universo cuando cumplía los primerísimos milenios de millones de años en su vida.



En esta imagen y las dos siguientes se presenta el resultado de tres simulaciones, mostradas en orden cronológico según la edad del Universo, de la distribución de la materia oscura en el Universo, realizada en 2006 en la Universidad de Chicago utilizando un potente ordenador. Corresponde a un cubo en el espacio de unos 280 millones de años luz. Aunque corresponde a la materia oscura, podemos asemejarla a la distribución de galaxias, ya que la gravedad de la materia oscura es la que ayudó a la condensación de las estructuras visibles (Imagen: Andrey Kravtsov, fair use)

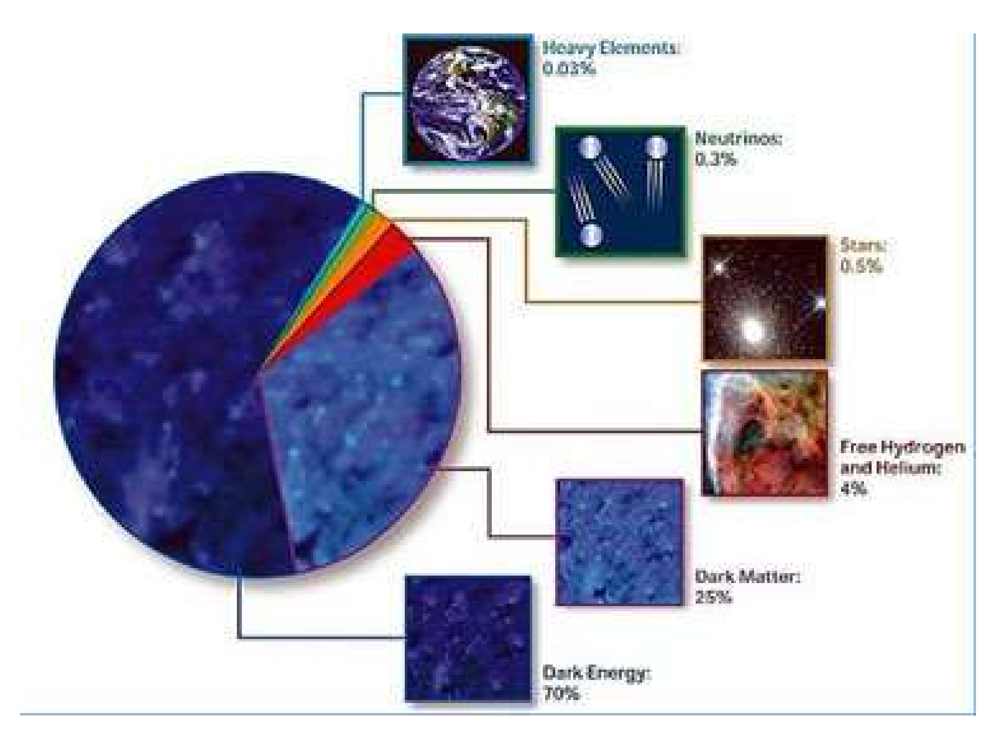




El Universo seguía creciendo su tejido espacio-temporal. El campo inflatón había dado un impulso tremendo, exponencial, al crecimiento de aquella pequeña burbuja planckiana inicial. El campo inflatón se había frenado cuando su energía ganada del vacío se había convertido en materia y radiación, pero el universo siguió su ritmo. Seguramente, gracias al influjo de otro campo que insuflaba presión negativa interna al espacio-tiempo, que habría aparecido por un procedimiento semejante al inflatón o al Higgs, alcanzando un verdadero vacío -para él- con un nivel de energía mínimo. Einstein, en una primera aproximación, había intuido que el Universo debía refrenar la expansión que predecían las ecuaciones de la relatividad, ya que para don Alberto éste tenía que ser estable y eterno. E ideó un factor energético que modificaba la geometría del cosmos al controlar

la tendencia a la compactación de la gravedad. Le llamó la **constante cosmológica**, y la nominó con la letra griega lambda, **Λ**.

Pero la idea no se ajustaba completamente a la realidad. Unas decenas de años más tarde se descubrió -lo hizo el astrónomo Edwin Hubble- que las galaxias se separaban unas de otras, y a mayor velocidad cuanto más lejos estuvieran. Esto indicaba que la separación de galaxias no se debía a su propia dinámica de cuerpo celeste, sino que era el propio sustrato el que iba ampliando las distancias. El campo Λ estaba estirando al espacio-tiempo, y para ello contaba con un valor constante de energía en todos los puntos del universo de 10^{-12} eV. Y en este caso constante quiere decir *constante*: a medida que va creciendo sigue añadiendo 10^{-12} eV en los nuevos espacio-tiempos recrecidos. ***Así lo observamos***. El problema es que, ***según nuestros cálculos teóricos***, un campo cuántico de este calibre no debería tener tan poca energía; la teoría exige un incongruente salto hacia mayor energía, exige un factor multiplicador que pudiera ser de hasta 10^{120}.[1]



Reparto observado de la energía/materia en el Universo. La parte proporcional a la radiación de fotones -que no aparece en este gráfico- es despreciable frente a los otros componentes[3] *(Wikimedia, dominio público)*

De todas formas, es lo que necesitamos para explicar nuestro mundo. Ya dijimos en el capítulo 19 al hablar de la radiación de fondo de microondas, que para explicar la planitud de nuestro Universo necesitamos una densidad de energía determinada y precisa. Ni muy grande, que hubiera colapsado ya el universo hace tiempo, ni muy pequeña, que lo hubiera difuminado hace mucho también. Se requieren exactamente 9,47 x 10^{-27} kg/m^3, y la materia bariónica más la oscura solo nos explican hasta un 30% de este valor. Ahí entraría en nuestra ayuda un nuevo e incierto personaje, la energía oscura generadora de la constante cosmológica Λ, que sería la responsable de llegar al 100% de las necesidades teóricas y observadas.[2]

La energía oscura se presentaba como un elemento muy débil al principio, tan débil que la propia débil gravedad podía con ella, haciendo que el ritmo de expansión se fuera ralentizando. Pero más vale la constancia que la fuerza, y la energía era esto: constante. Constante en el sentido de que, a medida que iba creciendo el universo con un factor de escala **a**, la constante energía oscura iba embalsándola a base de ir acumulando su pequeño valor a un ritmo $\mathbf{a}^3$. Y sucedió algo así como lo que cuenta la famosa leyenda del ajedrez, en la que se iban duplicando los granos de trigo depositados sobre cada cuadrícula, empezando por uno en la primera…[4] Con el tiempo, la cuantía absoluta almacenada de energía oscura se hizo descomunal, tanto que logró romperle el pulso a la gravedad. De forma que, hace unos 9.000 millones de años, lo que era una expansión decelerada pasó a ser acelerada, y cada vez a mayor ritmo. Y así hasta lo que vemos hoy en día… ¿hasta cuándo? ¿Será tan abundante que inducirá una tensión tal que romperá finalmente el tejido espacio-temporal? No tengamos miedo, no sabemos lo que pueda pasar, ni ningún hombre lo comprobará personalmente. Hoy en día vivimos un momento bastante calmado, bien cierto que con una velocidad de expansión -constante de Hubble- de 71.9+2.4/−3.0 (km/s)/Mpc, siendo un Mpc (Megaparsec) una distancia igual a 3,26 millones de años luz.[5] Parece mucho, pero… la estructura del Universo aún no sufre por ello. Las concentraciones

de masa, en las distancias cortas donde se manejan, aún son más objeto de la avidez de la gravedad que del desleír de la energía oscura. Ahí están estas estructuras, empezando por la Vía Láctea que está al alcance de nuestra vista en cualquier noche despejada. Ahí están, perdidas en la infinitud después de seguir el patrón de anisotropías de materia y energía liberada en el año 380.000 tras el Big Bang, cuando se produjo la recombinación de núcleos y electrones.

Veamos ahora cuál es el cuadro marco de la dinámica del Universo que acabamos de esbozar. Inicialmente, el Universo surge y vive a lo largo de un periodo en el que domina la radiación sobre la materia: las altas energías, o temperaturas, que es lo mismo, fijaban la dinámica del tejido espacio-temporal y de todo lo que ahí pasaba. Con el paso del tiempo y la progresiva expansión la temperatura disminuyó y la radiación amplió su longitud de onda: se había hecho menos energética. La caída de su energía era proporcional al exponente cuarto del factor de expansión,[6] mientras que la materia simplemente disminuía su densidad en un factor al cubo.[7] La consecuencia es que llegó un momento en la carrera en el que la materia aportaba más densidad de energía que la radiación. Junto a ellas dos se encontraba la energía oscura intrínseca al propio tejido espacio-temporal del Universo, que, al ser "pequeña" en aquellos momentos frente a lo que sería después, apenas tenía incidencia sobre la materia o la radiación. Ese momento en que la materia sobrepasó a la radiación comenzó a tener lugar tan pronto como unos 300.000 años antes de la recombinación, que fue cuando el triunfo fue definitivo. A partir de entonces fue la materia la que dirimió lo que le pasaba al Universo. ¿Para siempre? Pues no, ya que ahí seguía la modesta energía oscura insuflando hálito al creciente volumen del universo, mientras la materia -y no digamos la radiación- diluía su poder en la expansión. Y llegó lo esperado, el momento en que la energía oscura ganó finalmente la batalla a la materia: eso pasó hace unos 6.200 millones de años,[8] y tras este momento todo lo que vino después, entre ello todos nosotros, quedó absolutamente condicionado por dicha energía.

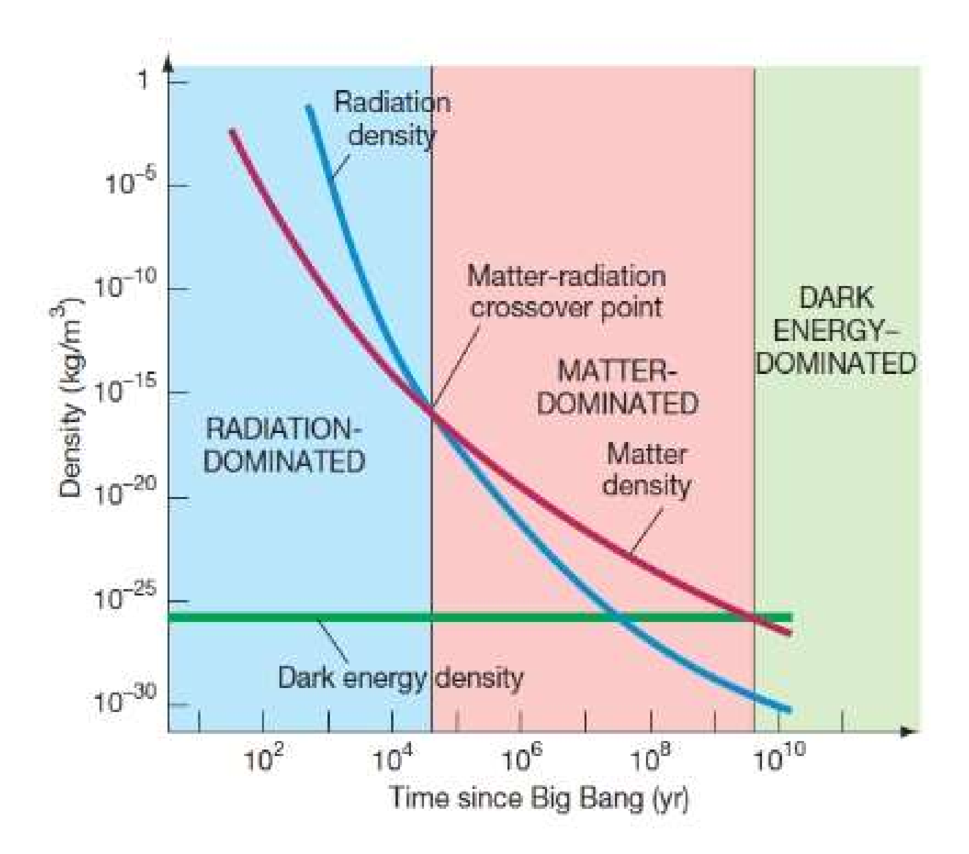


Gráfico que explica con claridad las distintas épocas del Universo y los distintos personajes -y la variación de su influjo- dominando la dinámica del Universo (Imagen: "Astronomy today" Fig 27.1, fair use)

Ése es el Universo dinámico del que estamos contando su vida. Al final del capítulo anterior habíamos llegado más o menos al año 3.000 millones tras el Big Bang. Es decir, en la figura anterior casi en el borde de la zona roja, dispuestos a dar el salto a la zona verde. El Universo había sobrepasado la efervescente etapa de la adolescencia, dirigiéndose hacia una estable madurez. Es un buen momento para ampliar lo que veníamos diciendo en el capítulo anterior cuando explicábamos cómo era el Universo y cómo evolucionaban sus estructuras primeras: en particular, hablaremos más de las galaxias.

NOTAS DEL CAPÍTULO 26:

1. Sí, diez elevado a ciento veinte. Nada menos. Podéis ver una mayor explicación en el capítulo 6 de este libro.

2. En el capítulo19 de esta serie ya se habló sobre este reparto de la masa crítica del Universo.

3. En el Universo encontramos a los fotones de la radiación de fondo -tan "fríos" como a 2,725K- que aportan una energía en un orden de magnitud cuatro veces inferior a la de materia y energía oscura, y encontramos a los fotones resultado de los procesos de fusión en las estrellas. Al ser el vacío del Universo tan enorme, estos últimos fotones aún pesan menos que los anteriores. En concreto, una décima parte de la radiación de fondo.

4. En el enlace de abajo se explica de una forma amena la mencionada leyenda y las consecuencias a que se llegó:

   [http://matematicascercanas.com/2014/03/10/la-leyenda-del-tablero-de-ajedrez-y-los-granos-de-trigo/]

5. El valor de la constante de Hubble se va afinando continuamente con el tiempo como podemos ver en esta dirección:

   [https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble%27s_law]

6. Un factor al cubo lo introducía la propia expansión, que diluía volumétricamente a la población de la radiación, mientras que la expansión de la longitud de onda era lo que lo subía al exponente cuarto.

7. El que fija el propio aumento del volumen del espacio-tiempo debido a su expansión.

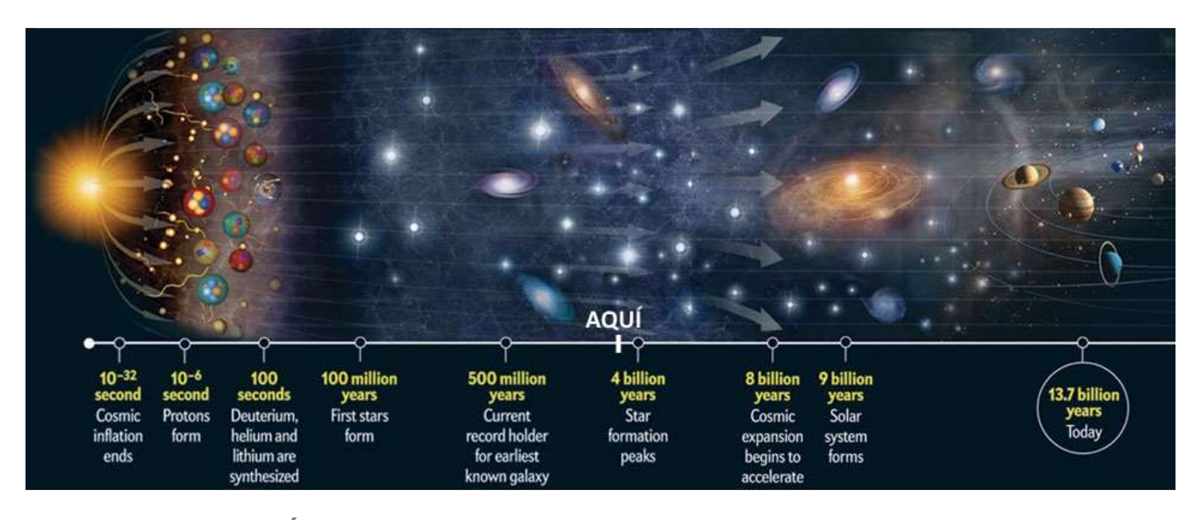
8. Tenéis un cálculo de la fecha del cambio a una expansión acelerada en la siguiente entrada de la web "*La web de Física*":

   [http://forum.lawebdefisica.com/entries/623-El-inicio-de-la-expansi%C3%B3n-acelerada-del-Universo]

27: Un Universo de galaxias

después de los primeros 3.000 millones de años

En el anterior capítulo nos habíamos tomado un respiro para ver un poco lo que llamaba “el bosque” del Universo desde una conceptual vista de pájaro. La película cronológica de la serie de hace dos capítulos, el número 25, la habíamos “congelado” en un universo lleno de agujeros negros, cúmulos, cuásares, galaxias y estrellas. Desde el fin de la reionización, quizás hacia el final del tercer mil millón de años, el universo veía cómo su vida empezaba a hacerse más tranquila. Se habían ido colapsando las primeras estructuras, unas sobre otras, hasta alcanzar un régimen que podríamos llamar “normal”. Normal según lo que estamos viviendo en nuestros momentos del Cosmos.



Estamos AQUÍ (Imagen: a partir de “Scientifc American”, marzo 2012, fair use)

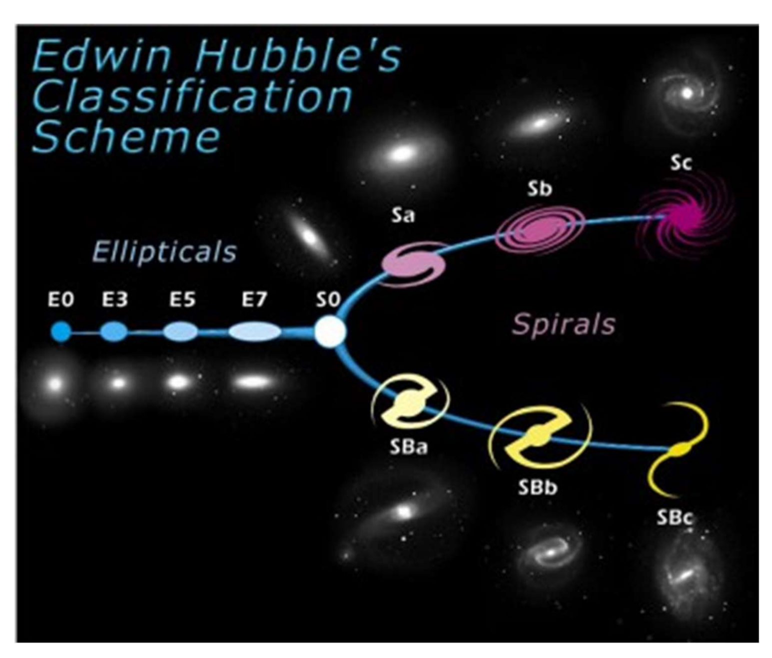
A falta de poder testar en directo lo que le sucede al Universo por razones casi obvias, tenemos varias teorías acerca de cómo se generaron las galaxias. La más aceptada actualmente es que han ido evolucionando a partir de la fusión de concentraciones de masa pequeñas, pequeñas concentraciones de gases del tamaño de los cúmulos estelares -los que observamos actualmente se mueven en un

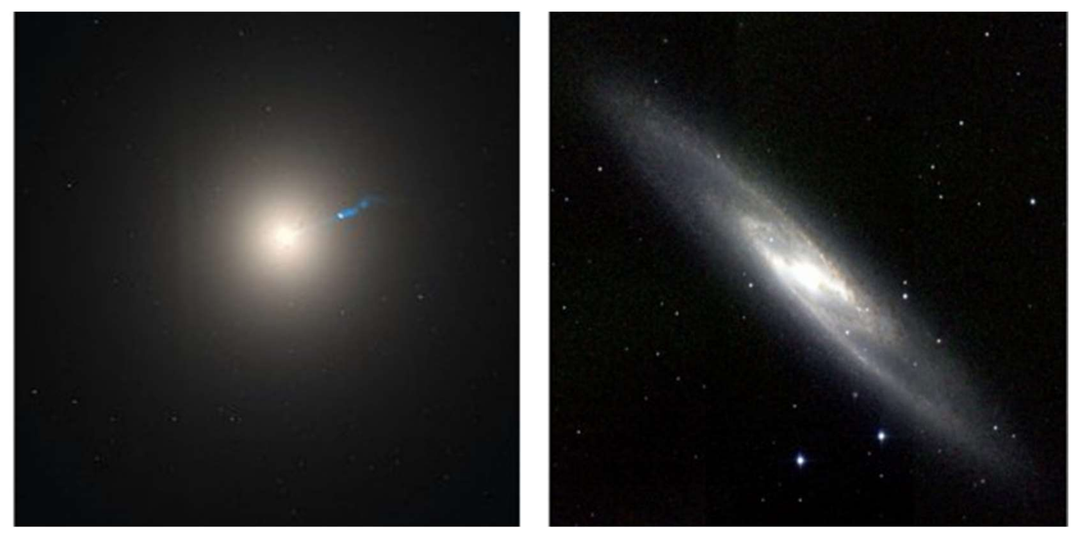
rango del orden de centenares a millones de estrellas- que luego, por fusión, pasaron a constituir una galaxia. Las primeras eran muy irregulares y no sabemos muy bien cómo pudieron pasar a ser de la tipología que observamos hoy en día.

El astrónomo Edwin Hubble clasificó a las galaxias en dos grupos, las elípticas y las espirales, por razones obvias de su geometría, como podemos ver en la imagen de más abajo. Hemos simplificado el texto al hablar solamente de estos dos tipos, elípticas E y espirales S, ya que en la realidad hay dos tipos más: las irregulares, una especie de elípticas, y las barradas Sb, que son espirales con dos brazos muy definidos y un bulbo alargado interior que los une. Y entre las elípticas y las espirales, las lenticulares, S0. Esta clasificación plasmada en el esquema de la imagen, conocido como el diapasón de Hubble, no tiene en realidad nada que ver con la secuencia de formación de las galaxias. Más bien pudiera la secuencia ser una imagen especular del tenedor de Hubble, es decir, por fusión de espirales se pasaría a elípticas. Además, hoy en día se considera que hay mejores argumentos que la "forma" para clasificar a las galaxias. A fin de cuentas Hubble las clasificó viéndolas sólo en las frecuencias de luz visibles. Posiblemente la clasificación hubiera sido distinta si hubiera podido verlas también en otras frecuencias.

Las del primer tipo -las elípticas- disponen de abundante gas caliente a tan altas temperaturas que es muy difícil el que nazcan actualmente estrellas en ellas, debido a las altas velocidades del material que deben compactar. La mayoría nacieron durante los primeros años de vida de la galaxia. La existencia en ellas de elementos "pesados" -más allá del helio- indicaría también su antigüedad, que son galaxias más viejas. Las galaxias espirales, en cambio, tienen discos ricos en gases no demasiado calientes, por lo que siguen generando estrellas a un ritmo mucho más lento que el inicial en la generación de estrellas de las galaxias elípticas.[1] Siempre se había pensado[2] que de las más globulares elípticas se pasaría a las espirales de acuerdo a una previsible dinámica del movimiento de giro de sus masas. Pero el hecho de que la galaxia más grande conocida sea una elíptica, la IC

1101, con un tamaño de unos 400 mil años luz, constituya una pista que nos lleve a pensar que el proceso pudo quizá ser al contrario. Sea como fuere, lo que es cierto es que los astrónomos tienen serias evidencias observacionales de que las colisiones e interacciones entre galaxias son muy comunes y que estos encuentros son los principales procesos físicos que condicionan la evolución de las galaxias.

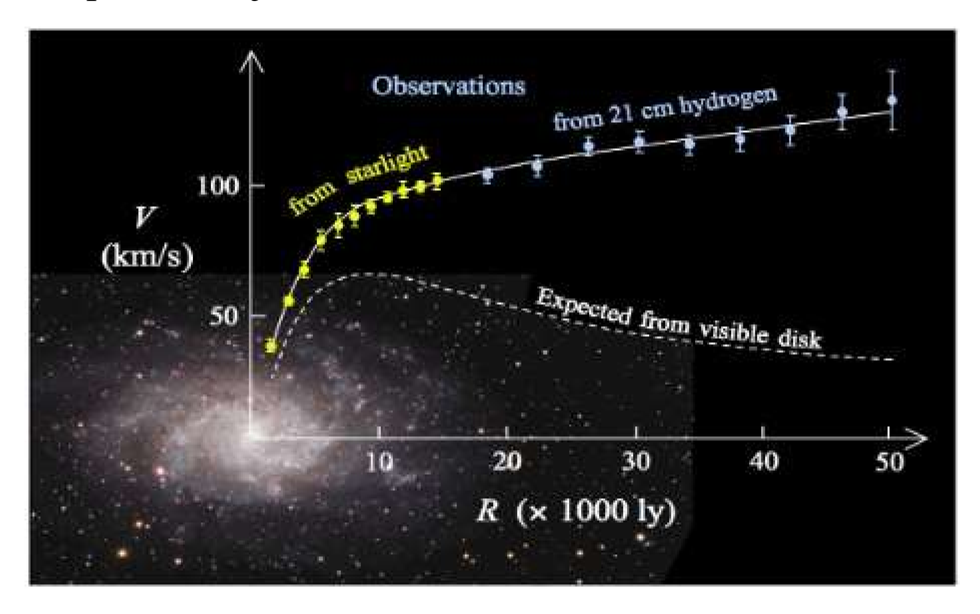




A la izquierda, tipos de galaxias de acuerdo al esquema de clasificación de Hubble. En el centro un ejemplo de galaxia elíptica: la galaxia Virgo A M87 con la emisión de un chorro de materia y a la derecha una galaxia espiral barrada NGC 253 (imágenes de Wikimedia, dominio público)

Las galaxias espirales presentan un núcleo central globular, rodeado por un disco orientado más o menos en un plano. Las elípticas carecen de este disco de gases y estrellas. En ambas la estructura globular central está rodeada con mucho por un halo de materia normal, y todo ello sumergido en un halo de materia oscura que realmente constituye el mayor porcentaje de su masa, hasta un 90% del total. Además, la mayoría de las galaxias gigantes, de los dos tipos, tienen un agujero negro supermasivo en su centro, lo que posiblemente fue su semilla inicial.

Tenemos que hacer una precisión acerca de la dinámica de la materia oscura y su incidencia en la formación de las galaxias. Hasta ahora, en toda la serie hemos afirmado que la materia oscura es la cocinera básica de todo el guiso cósmico que observamos. Es cierto, y debió de estar ahí con su influjo desde antes de la era de la recombinación, cuando el Universo era un plasma caliente con unos flujos de materia y presión que asemejaban una sinfonía sonora.[3]



Estudio de la curva de rotación de la galaxia M33. Los puntos en amarillo y azul son los observados a partir de diversas metodologías. La curva de trazos blancos es la prevista de acuerdo a la distribución de la materia visible de la galaxia. La discrepancia entre las dos curvas se puede corregir añadiendo la masa de un halo de materia oscura que rodee a la galaxia (Wikimedia, dominio público)

En el capítulo 20, que titulamos "*La materia entra en faena*", comentamos que una de las pistas que nos dice que sí, que efectivamente hay algo ahí que es la materia oscura, es el análisis de la velocidad de las estrellas rotando alrededor del eje de su galaxia. Las galaxias más próximas a nosotros en el tiempo mantienen en la zona exterior unas estrellas "anormalmente" aceleradas, lo que suponemos que es debido a la gravedad de la gran masa de materia oscura que "sobrevuela" y acoge a la materia normal, la que vemos, la que forma las estrellas.[4]

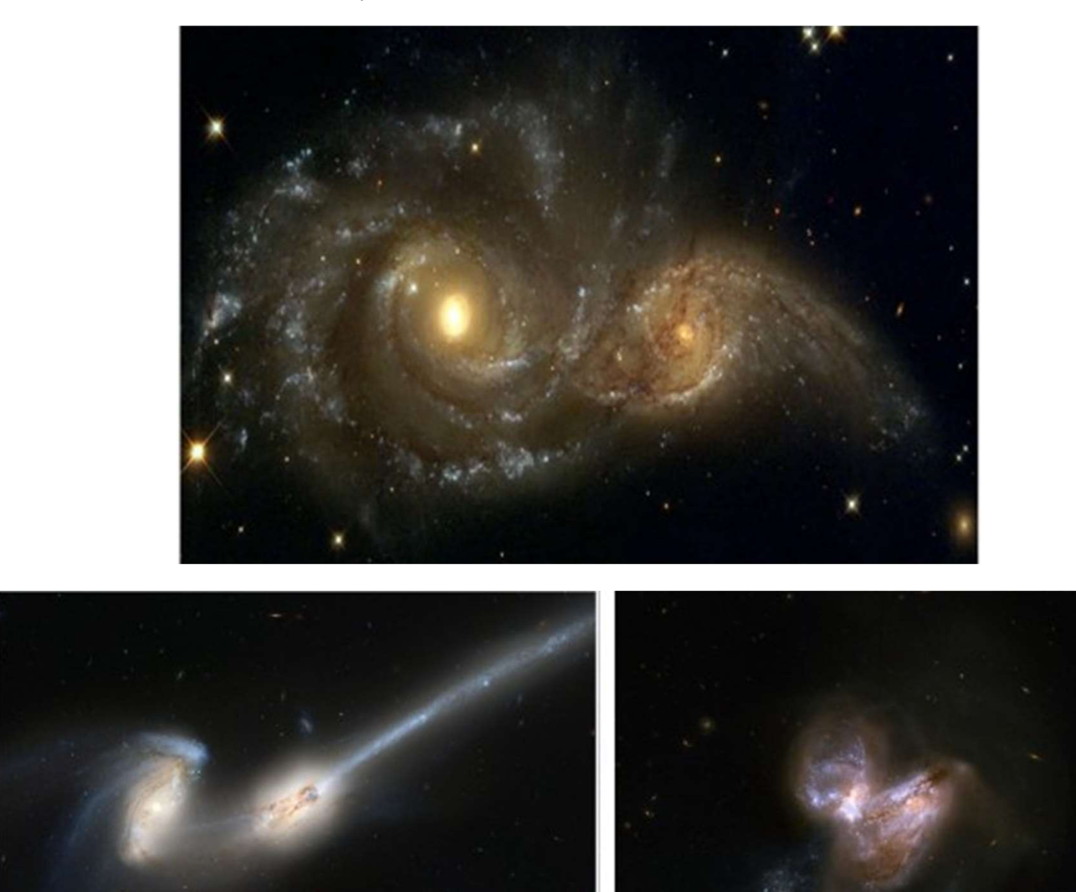
Ahora bien, esto no siempre fue así o, al menos, con la misma intensidad. Se sabe[5] que en las galaxias con un gran corrimiento al rojo, observadas por tanto en épocas más antiguas, la velocidad de las estrellas va disminuyendo drásticamente a medida que se encuentran más alejadas del centro galáctico, lo cual indica que en aquellos momentos tempranos la influencia de la materia oscura no era tan fuerte como lo es hoy en día. Y eso ¿qué nos dice? Pues que la materia oscura, a pesar de ser actor y director crucial en las compactaciones gravitatorias que dan forma a las estructuras del Universo, sufrió en su propio proceso una dinámica mucho más atemperada que la observada en la materia "normal". En una palabra, a la materia oscura le costó compactarse. O mejor, su proceso de compactación, aún siendo muy potente, sufre una especie de amortiguamiento, una plasticidad mayor, lo que hizo que se prolongase durante muchos millones de años más en comparación con el proceso gravitatorio equivalente de la materia bariónica.

La evolución de las galaxias está muy condicionada por los "choques" entre ellas y los consiguientes fenómenos inducidos de generación estelar y modificación en la distribución de gases. En el universo encontramos muchos cuerpos unidos por interacciones gravitatorias, entre ellos las galaxias, en una dinámica que es difícil de ser anulada. Con el tiempo, estas galaxias atadas por la gravedad acabarán entrando en senda de colisión. No pensemos que este proceso sea como un choque de trenes: no chocan estrellas contra estrellas, ya que éstas están tremendamente separadas unas de otras

en comparación a su tamaño, sino que más bien se produce una mezcla progresiva de los componentes de las galaxias. De todas formas tampoco es un proceso tan suave, ya que la fricción de los gases entre las dos galaxias origina normalmente ondas de choque que generan nuevas estrellas, mientras que, por el contrario, una parte de las estrellas existentes serán lanzados al espacio exterior. El resultado es que se llegará a formar un cuerpo único -una nueva galaxia- en un estado estable. Si las galaxias que se fusionan son de un tamaño similar y pequeño, lo más probable es que aparezca una galaxia elíptica.[6] La mayoría de los encuentros galácticos se produjeron para z -corrimientos al rojo- mayores de 1, antes de cumplirse los 3.000 millones de años tras el Big Bang, cuando las galaxias se encontraban más compactas, lo cual es bastante lógico. Pero debemos pensar que, a medida que con el tiempo y la expansión disminuye la densidad de galaxias, el número de aproximaciones, encuentros y colisiones tuvo que ser menor.

Los astrónomos trabajan principalmente con tres tipos de interacciones galácticas, agrupación fruto de simulaciones con computadores contrastadas con las observaciones. Una primera sería el caso de aproximación de dos galaxias, *una con una masa mucho más pequeña que la otra*. La mayor canibaliza a la pequeña en un proceso en el que el halo de la mayor interactúa con la menor, haciendo que esta última inicie un baile en espiral sobre la grande emitiendo hacia el exterior, en la dirección de la aproximación, parte de sus estrellas -lo que se conoce como la cola de marea-. Un segundo tipo de interacción galáctica se produce cuando *una de ellas tiene ligeramente menos masa que la otra.* En este caso la menor puede inferir en la mayor la generación de nuevos brazos de espiral y la creación de nuevas estrellas. El tercer tipo corresponde a la situación de encuentro entre *dos galaxias comparables en masa y tamaño*. El choque, y las supernovas generadas en el subsiguiente episodio de intensa creación de nuevas estrellas, hace que los discos se rompan y que el gas de las galaxias sea expulsado al espacio intergaláctico.

Cuando todo se calma aparece una galaxia elíptica con un halo visible en la frecuencia de rayos X.



Diversos casos de fusión de galaxias. Arriba las galaxias NGC 2207 y la ligeramente más pequeña IC 2163 (Wikimedia, dominio público). Abajo a la izquierda las "galaxias ratón" NGC 4676A/B (Wikimedia, dominio público). Abajo a la derecha una "colisión" entre galaxias de igual tamaño, las "galaxias antena" NGC 4038/4039 (Imagen: Hubble Space Telescope, CC BY 4.0)

A la par de estas danzas entre pares, las galaxias se iban organizando. En la frontera entre el primer y el segundo millar de millones de años las galaxias comenzaban a unirse formando "proto-cúmulos", siguiendo un proceso que ya hemos explicado más arriba. A partir del tercer milenio de millones de años se formaron ya los verdaderos cúmulos de galaxias.[7] Y en el quinto milenio de millones la

gravedad había conseguido formar supercúmulos. No os imaginéis a los cúmulos de galaxias como unos racimos cósmicos más o menos densos en donde las galaxias serían los granos y el resto vacío o ligeramente ocupado por gases, aunque realmente así nos lo parece cuando los vemos en una imagen en la frecuencia de lo óptico. Es algo mucho más complejo. Para empezar, hay el doble más de gases que de materia bariónica luminosa -concentrada en las galaxias-, gases que provienen de distintos orígenes, desde el primigenio del Universo -H y He primordiales- hasta el que es producto del proceso que siguen la supernovas, y tan calientes[8] que pueden ser apreciados en el espectro de los rayos X. Pero eso es aún una nimiedad al lado de la materia oscura que los conforma, ya que ésta representa entre el 80 y el 85% de la masa total del cúmulo.[9] Realmente podemos pensarlos como "ameboides", con su propia vida y una larga evolución gravitatoria hacia el equilibrio dinámico en sus organismos,[10] lo que les lleva normalmente por una senda de progresiva estabilidad: los cúmulos que observamos de forma irregular aún no han llegado a ese equilibrio, estando aún en proceso de formación y siendo dominados por las galaxias espirales, mientras que los cúmulos de forma más regular son más estables, más relajados, quizás porque son más viejos y han tenido tiempo para llegar al equilibrio, siendo dominados por galaxias elípticas.

En la imagen siguiente podemos contemplar casi en vivo y en directo a los componentes de base de uno de esos cúmulos. Se trata de la representación del Cúmulo Bala (1E 0657-56) -situado en un corrimiento al rojo de z=0,3- en donde se han superpuesto las imágenes de frecuencias ópticas y las de rayos X. Es la estampa real de lo que se cree el resultado del choque de dos cúmulos galácticos, habiendo el pequeño atravesado al mayor. Realmente la "bala" es el cono rosáceo de la derecha. Esos rosas corresponden a los gases hipercalientes de los cúmulos y a la materia bariónica también a muy alta temperatura como consecuencia del choque. Las zonas azules se corresponden a la materia oscura acompañante calculada a partir de técnicas que usan a las lentes gravitatorias.

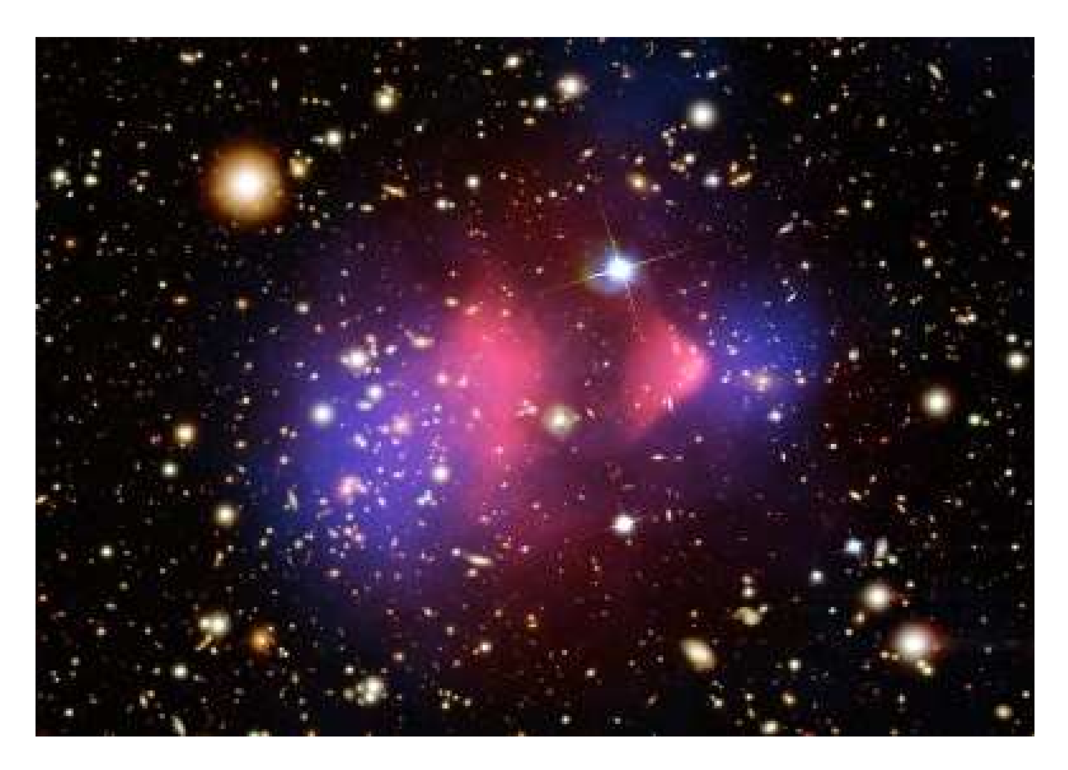


Imagen del cúmulo Bala *(1E 0657-56) (Imagen: X-ray: NASA/CXC/CfA/ M.Markevitch et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/ D.Clowe et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al., sólo para uso no comercial, educacional o información)*

Esos gigantes en la escala de estructuras del Universo, los **cúmulos de galaxias**, son muchas órdenes de magnitud mayores que los cúmulos de estrellas ya que se tratan de superestructuras cósmicas formadas por miles de galaxias unidas por la acción de su gravedad y de la materia oscura que las acompaña. El más masivo conocido se trata de SPT-CLJ2106-5844 que tiene una masa del orden de $1{,}27\times10^{15}$ masas solares. A unos cuantos pasos más allá se encuentran los **supercúmulos**, que son estructuras más complejas formadas por centenares o miles de cúmulos galácticos interaccionando gravitatoriamente entre sí. Tenemos un ejemplo cercano en el que participa nuestra Vía Láctea, una galaxia antigua con 13.210 millones de años, que se encuentra en un cúmulo de galaxias llamado el Grupo Local, en donde forman un vecindario de unas 54 galaxias. El Grupo Local pertenece a su vez al supercúmulo Laniakea, con unos 300 a 500 cúmulos de galaxias y cuyo tamaño es de 500 millones de años luz.

Con lo dicho hasta ahora tenemos un nivel de conocimiento a la altura de las galaxias agrupadas en cúmulos más o menos grandes. Las galaxias son estructuras constitucionales clave, bisagra entre lo grande y lo pequeño en un Cosmos repleto de materia y energía. Galaxias repletas de estrellas de primera generación, las de Población III. Hasta ahora sólo hemos visto que el Universo, durante la nucleosíntesis, había dado a luz a mucho hidrógeno, menos helio y unas pizcas de litio. Pero es evidente que a nuestro alrededor hay algo más, vemos cosas de lo más diversas, desde conchas de moluscos hechas de calcio, a centrales eléctricas consumidoras de uranio, o clavos de ferroníquel. ¿De dónde ha salido esta variedad, todos los elementos químicos que vemos a día de hoy? Este misterio es lo que intentaremos analizar en el capítulo que sigue.

NOTAS DEL CAPÍTULO 27:

1. La imagen que sigue no hace honor a una clasificación según el color real, ya que el azul correspondería a galaxias con mayoría de estrellas jóvenes y el rojo correspondería a galaxias con estrellas más viejas. Quizás el hecho de que las galaxias elípticas hayan sido más rápidas en la generación de sus estrellas, que por tanto son más viejas y con tendencia de su luz a las frecuencias rojas, mientras que las espirales sigan aun generando muchas estrellas, jóvenes y azules, sea lo que ha provocado la selección de color en la imagen que acompaña el texto. Quizás interese obtener una ampliación sobre el porqué de una clasificación de color, lo que tenemos en los dos enlaces siguiente (el segundo en español):

[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Galaxy_color%E2%80%93magnitude_diagram]

[http://angelrls.blogalia.com/historias/75290]

2. Siendo el iniciador de la idea el prolífico astrónomo Hubble.

3. Lo hemos visto en capítulos anteriores, desde el 15 al 20.

4. Pensemos en lo que pasa en la Tierra. En su superficie, para que no se caiga una bala de cañón disparada paralela al suelo, habría que imprimirle una velocidad descomunal para luchar contra la elevada gravedad en este punto. Sin embargo, en el espacio hay zonas de menor gravedad en la que incluso los objetos pueden situarse a velocidad relativa cero con respecto a la superficie de la Tierra, en posiciones que llamamos "geoestacionarias". Trasladando el fenómeno al caso de las estrellas de una galaxia, éstas giran a mayor velocidad de lo esperado precisamente debido a la gravedad suplementaria de la materia oscura.

5. Tenéis los datos en un artículo publicado en la revista Nature de marzo de 2017, "*Strongly baryon dominated disk galaxies at the peak of galaxy formation ten billion years ago*" de R. Genzel et al.

6. Se supone que cuando interactúan gravitacionalmente galaxias enanas, al ser la masa final también pequeña no habrá suficiente potencial gravitatorio como para "disciplinar" los movimientos iniciales de las galaxias, con direcciones al azar, por lo que se generaría una galaxia elíptica en vez de una galaxia espiral en donde todos sus componentes tienden a girar sobre el punto central.

7. Ojo, no nos despistemos: remarco que ahora estamos tratando de agrupaciones de galaxias, y no de cúmulos estelares, que se encuentran dentro de una galaxia.

8. A temperaturas típicas del orden de 10^7 a 10^8K.

9. La masa típica de un cúmulo de galaxias es de 10^{14} a 10^{15} masas solares, pero su luminosidad es de solo 10^{12} veces la luminosidad solar. Esos números nos dicen que atendiendo sólo al espectro óptico se nos puede escapar grandes cantidades de masa. La masa de la materia oscura.

10. Técnicamente, este equilibrio se consigue cuando entre los elementos de un sistema se corresponde la energía potencial promedio de los mismos con su energía cinética promedio, en una

relación de dos a favor de la energía cinética. En la teoría se le conoce como el *teorema del virial*, y cuando un sistema llega al equilibrio dinámico representado por este teorema se dice que está "virializado". Este teorema se usa en variadas disciplinas -en particular la Cosmología- para calcular la energía cinética total promedio de sistemas muy complejos en los que es muy difícil obtener una solución exacta.

28: La fiesta continúa en las estrellas

En el capítulo que antecede hicimos una parada en el camino para observar y reflexionar sobre el marco general al que habíamos llegado tras unos 3.000 millones de años de vida del Universo. Nuestro biografiado, el Universo, comenzó con la era de la radiación, luego pasó a la era del dominio de la materia y, una vez situada en el momento de estos 3.000 millones de años, pronosticó un futuro reinado de la energía oscura. Habían nacido las primeras estructuras observables del Universo: agujeros negros, cúmulos de gases, galaxias y estrellas de lo más variopintas. Entre todas ellas escogimos a las galaxias como elemento bisagra entre lo grande y lo pequeño, vimos cómo eran y además sabemos que las primeras estaban formadas solamente por escasamente un par de tipo de átomos. Y nos preguntamos más.

Repito lo que fue el final del capítulo anterior: "*...es evidente que a nuestro alrededor hay algo más, vemos cosas de lo más diversas, desde conchas de moluscos hechas de calcio a centrales eléctricas consumidoras de uranio, o clavos de ferroníquel. ¿De dónde ha salido esta variedad, todos los elementos químicos que vemos a día de hoy?*" Sin embargo, hasta ahora sólo hemos visto que el Universo, durante la nucleosíntesis, había dado a luz a mucho hidrógeno, menos helio y pizcas de litio… ¿cómo entraron en escena el resto de elementos, calcio, uranio, hierro o níquel? Hacía mucho tiempo que unos niveles altos y precisos de energía habían favorecido el inicio de la nucleosíntesis. Pero a medida que el universo se iba expandiendo llegó un momento en que se enfrió tanto que ya no tuvo capacidad para formar núcleos más pesados. Luego la energía debe ser la explicación de todo… grandes cantidades de energía para poder coaligar hasta, por ejemplo, 244 protones y neutrones, que es lo que tiene el núcleo del plutonio-244, el último elemento natural de la tabla periódica de Mendeléyiev.



Sobre el profundo y casi mareante fondo del Universo, el ballet cósmico de las galaxias NGC 4038 y 4039, más conocidas como Galaxias Antena, observadas a la izquierda en colores ópticos y combinando en la derecha las imágenes ópticas con los datos de la emisión a 21 cm del hidrógeno atómico, que deja al descubierto en azul las largas líneas de estrellas, gas y polvo que son resultado del proceso de fusión entre ellas y que recuerdan las antenas de un insecto (Imagen: imagen óptica: Robert Gendler; imagen radio: John Hibbard, NRAO/AUI/NSF; combinación multi-frecuencia: Ángel R. López-Sánchez (AAO/MQU); fair use)

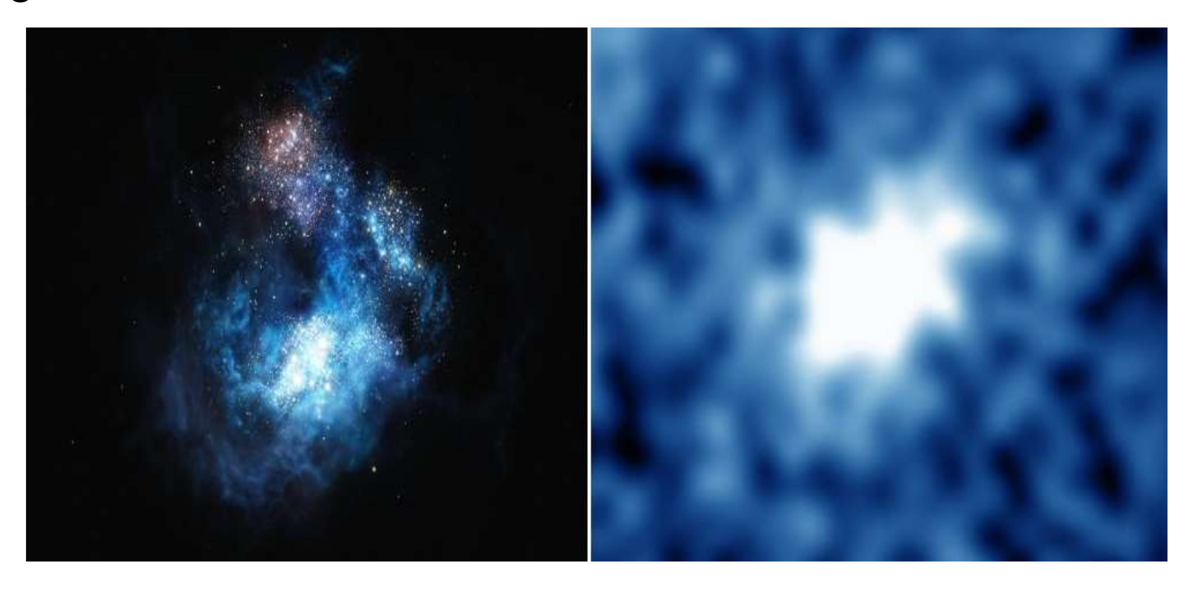
En el Cosmos tenemos dos fábricas de energía que cumplen estos requisitos. La primera la encontramos en las estrellas, durante su ciclo de vida ordinaria, en cuyos hornos nucleares pueden sintetizar hasta el elemento 56, el hierro. Más allá de él tenemos que acudir a la segunda fábrica disponible, como son las supernovas, durante cuyas explosiones se disipa una energía equivalente a la de cientos de miles de estrellas como nuestro Sol.[1] Hoy vemos a todos estos elementos químicos, pero durante la época de la reionización[2] había muy poquitos y recién estrenados. Las causantes fueron las primeras estrellas, de las que ya hemos hablado en capítulos anteriores, que son las que en sus procesos de fusión empezaron a crear elementos más allá del litio. Al morir las más grandes y masivas de esas estrellas

como supernovas, dispersaron sus gases formados por los elementos primigenios -hidrógeno, helio y litio- y los nuevos elementos que habían sintetizado en el interior de ellas a lo largo de sus vidas. A estas estrellas primerizas se les llama de población III. Las de nuestra época -aunque en este caso "época" abarca una gran parte de la vida del universo- son las de población I, encontrándose entre ambas, lógicamente, las de la población II.

Las **estrellas de población III** surgen de la necesidad teórica de que precisamente tenía que haber una fábrica de elementos más pesados que el litio. A efectos astronómicos, todos los elementos que van detrás de esos tres se les llama "*metales*", aunque químicamente muchos no lo sean. Pero a todos se les conceptúa como metales, de forma que, según veamos en una estrella más o menos de ellos, diremos que tiene más o menos **metalicidad**. Como ejemplo diré que nuestra estrella, el Sol, está catalogada como de una metalicidad alta, aunque sus cantidades absolutas de "metales" sean muy pequeñas comparadas con la cantidad total de hidrógeno. Pues bien, la existencia de las estrellas de población III es una necesidad para nuestra comprensión del universo, pero… no hemos detectado ni una. Lo cual es lógico, pues deben estar escondidas en corrimientos al rojo muy grandes, y las que puedan quedar de ellas tras millones de años de vida del Universo -es decir, intentando mirarlas más cerca, en su vejez, a z's menores- son muy pequeñas y están escondidas en galaxias o cuásares.

Según la teoría, deberían encontrarse en cúmulos de entre uno y cien parsecs [un parsec mide $3{,}0857 \times 10^{16}$ metros] de diámetro, mientras que las nebulosas de gas ionizado por estos cúmulos podrían llegar a tener un tamaño de aproximadamente mil pársecs. Realmente ¿qué es lo que vemos? El objeto astronómico más lejano conocido es la galaxia GN-z11 cuyas estrellas lucían ya a los 400 millones de años del Big Bang. El cuásar más antiguo detectado se trata de ULAS J1120+0641, situado en un corrimiento al rojo de 7, lo que quiere decir que por lo menos ya enviaba su radiación a los 800 millones de años tras el Big Bang. Estos dos cuerpos cósmicos

seguramente eran, o fueron, portadores de estrellas de población III. La estrella más lejana que conocemos, SDSS J0018-0939, en el campo de la constelación de la Ballena, a 1.000 millones de años tras el Big Bang, es ya de población II, puesto que observamos en ella cierta metalicidad. El estudio de la galaxia más luminosa conocida, CR7, situada en el campo de la constelación de la Osa Mayor, a 700 millones de años tras el Big Bang, parece asegurar que puede ser una combinación de estrellas de población III y de otras estrellas "normales". Las primeras determinaron la emisión de rayos ultravioleta de la galaxia -buenas candidatas para cebar la reionización- y la emisión de gases hacia su periferia, con lo que formó a su alrededor masas nebulares interestelares; mientras que las segundas serían las que aportarían la mayoría de la masa de la galaxia.[3]



La galaxia Cosmos Redshift 7, conocida como CR7. A la izquierda una interpretación artística (Imagen: ESO/M. Kornmesser, CC BY 4.0) mientras que a la derecha la imagen real, tomada por el telescopio Very Large Telescope de la ESO (Imagen: David Sobral et al., fair use)

La teoría cosmológica nos dice también que las estrellas de población III, hipotéticamente, debieron ser estrellas muy, muy masivas (varios cientos de veces más masivas que el Sol), y calientes, sin metales. Aunque también se han hecho otro tipo de conjeturas que se objetivan

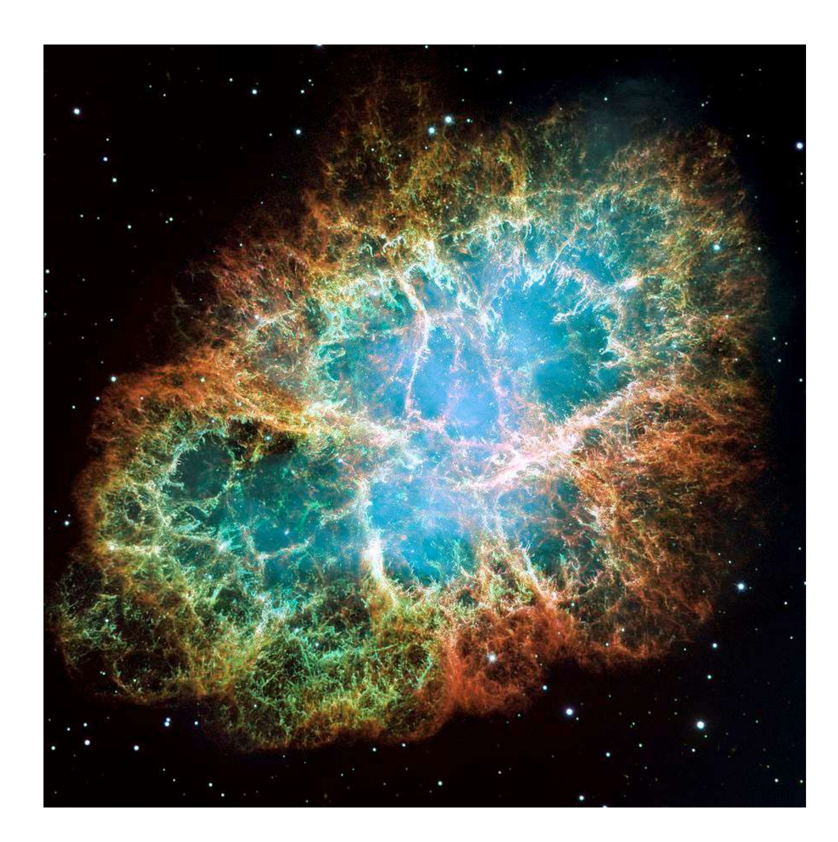
en unas galaxias conocidas como “azul débiles”. Débiles por su lejanía, aunque realmente serían muy brillantes. Serían galaxias enanas con gran cantidad de grandes estrellas jóvenes, que emiten preferentemente luz en el ultravioleta y el azul. Necesitábamos frecuencias UV para la reionización que se estaba dando. ¿Por qué estrellas grandes? Simplemente porque son precisas para explicar lo que vemos. Y lo que vemos es que ya había estrellas con una cierta metalicidad muy pronto tras la recombinación, **estrellas de población II**. Antes de que aparecieran en el escenario estas últimas, tuvieron que existir las correspondientes estrellas de población III que generaran en su interior esta metalicidad, la que luego recibieron las de la población siguiente. Pero el quid está en el poco tiempo que hubo entre la recombinación y las de población II, lo que precisa la existencia de estrellas primigenias III con una vida “nuclear” muy rápida… y esto exige estrellas de gran volumen, tal como hemos dicho, con unas masas de decenas o centenas de la del Sol. Las estrellas muy masivas sufren un colapso gravitatorio mucho mayor que el de las estrellas más pequeñas. Por eso, para contener su tremenda gravedad, requieren que sus reacciones internas de fusión sean muy potentes -muy energéticas-, lo que hace que se consuman muy rápidamente. Los cien o doscientos primeros millones de años tras la recombinación debieron estar dominados por este tipo de estrellas, quizás con vidas menores a un millón de años.

Posiblemente en estas primeras estrellas ya se llegaron a sintetizar átomos de carbono y de oxígeno. Y esto es significativo a la hora de entender qué es lo que pasó después de la desintegración de las estrellas de Población III. En las nubes de gases cósmicos el oxígeno tiende a reaccionar con el carbono, dando CO_2, y con el hidrógeno, dando agua como resultado. Y tanto el CO_2 como el agua son moléculas que, al calentarse en los procesos de compactación para formar nuevas estrellas, irradian en la frecuencia del infrarrojo, enfriando la nebulosa de gases, con el resultado de que la contrapresión gravitatoria de la masa que se compacta deberá luchar con una menor presión de radiación interna. Y eso las estrellas con

oxígeno y carbono lo podían conseguir con un menor volumen. La consecuencia fue que pudieron generarse estrellas de menor tamaño, con unos procesos internos de fusión muy lentos. Así que estas pequeñas estrellas de población II aún las podemos observar hoy en día, incluso en nuestra Vía Láctea.

No obstante, también se generarían estrellas masivas, de entre ocho y diez veces la masa del Sol, que durarían decenas de millones de años. Tenían la masa adecuada como para generar en su interior nuevos elementos, hasta el Hierro 56. Durante mucho tiempo se pensaba que todas las estrellas de población II tenían que ser de baja metalicidad, pero ya se sabe que esto no es cierto. En las galaxias, las estrellas de población II del halo estelar son efectivamente de baja metalicidad, pero las estrellas de población II del bulbo tienen metalicidades relativamente altas, parecidas a la de algunas estrellas de población I como el Sol. Así que la siguiente generación de estrellas, las de población I, pudieron obtener su elevada metalicidad gracias a las estrellas de población II, de las que algunas habrían generado en sus procesos de fusión interna los elementos de menor número atómico, hasta el hierro.

Algunas de ellas pudieron tener el tamaño necesario como para morir como una gigante roja produciendo en el proceso una expansión de sus gases, o bien hacerlo de forma más explosiva, como una supernova. Hoy en día estos procesos explosivos son muy comunes en estrellas con masas varias veces superiores a las del Sol: las supernovas del tipo II. A partir de su muerte espectacular, ya que explotan como una gran bomba, se crearon unas ondas de temperatura y energía que se expandieron a grandísimas distancias alrededor de un pequeño cuerpo residual. La energía fue tal como para iniciar, tanto en los gases producto de la explosión como en la materia intergaláctica que encontraban a su paso, una nueva cadena de fusiones a partir de los elementos pesados que se habían ido generando a lo largo de los millones de años en sus núcleos. El resultado de estas transformaciones apocalípticas fue la generación del resto de elementos que conocemos.



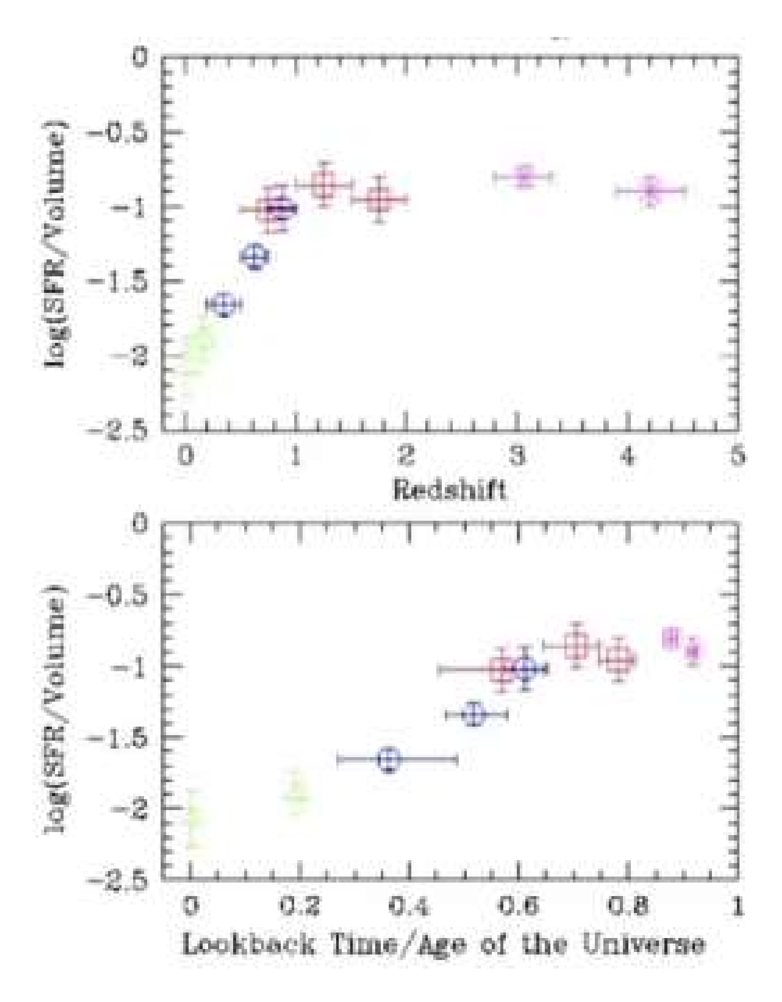
Nebulosa del Cangrejo, residuos de la explosión de una supernova. En su centro quedaron los restos compactos -una estrella de neutrones- en forma de un púlsar. Mientras que en los lejanos alrededores es evidente lo que pasó con los gases que eran el cuerpo de la estrella primera (Wikimedia: NASA, ESA, J. Hester y A. Loll (Arizona State University), dominio público)

De ahí surge la certeza de que las estrellas de población II fueron imprescindibles para generar ***los sistemas planetarios*** de las siguientes estrellas, puesto que en ellos una buena parte de los planetas interiores son de tipo rocoso, en cuya composición abundan los elementos pesados: hierro, calcio, silicio, carbono, oxígeno, aluminio… En febrero de 2014 se notificó el descubrimiento de lo que puede ser la más antigua estrella observada de este tipo de Población, la II. Se trata de SM0313, una estrella de la Vía Láctea a una distancia de 6.000 años luz del sistema solar y con una antigüedad que algunos aventuran en 13.600 millones de años (¡!). Es muy claro que posee metalicidad de bajo rango que a todas luces queda patente al estudiar su espectro: contiene trazas de carbono, magnesio y calcio. E incluso hierro, en cantidades mínimas -siete

ordenes de magnitud del que posee el Sol-, que es lo que ha permitido situarla en el tiempo como una estrella de Población II.[4]

La siguiente generación de **estrellas** fueron las **de Población I**. Normalmente son estrellas jóvenes, que se encuentran habitualmente en las galaxias espirales y, según sea su edad, se sitúan en ellas en distintas zonas: las más jóvenes cerca del bulbo de la galaxia y las de mayor edad alejadas de este centro. Ya hemos comentado que tienen una alta metalicidad, la mayor entre la de las tres poblaciones de estrellas. Apoyados en esta característica, hasta hace poco se pensaba que la alta metalicidad les hacía las mejores candidatas para tener sistemas planetarios, en especial los de tipo rocoso. Sin embargo, gracias a la misión Kepler, se han encontrado este tipo de planetas alrededor de estrellas con un amplio rango de metalicidades, e incluso se han hallado planetas gigantes gaseosos que sorprendentemente se encuentran agrupados alrededor de estrellas de alta metalicidad. Aún hay mucho que aprender.

Una vez presentadas las tres poblaciones estelares, y antes de pasar a desarrollar un poco más el tema de los sistemas planetarios, conviene dar un último apunte sobre la biografía de las estrellas. En el capítulo 24 habíamos apuntado que las primeras galaxias fueron muy abundantes y con estrellas jóvenes irradiando en la frecuencia ultravioleta. Con el tiempo el número de galaxias descendió, y pensamos que lo ha hecho en un factor de 20. Podemos extender la misma curiosidad a las estrellas: ¿hay más ahora que antes? ¿Al revés? ¿Cuál pudo ser la dinámica en su formación? Los astrónomos hacen sus cálculos a partir de la luminosidad de las galaxias, lo que les permite hacer una razonable extrapolación de la cantidad de estrellas que las "habitan". Desde las lógicamente escasas primeras estrellas formadas se debió dar una escalada en su población hasta alcanzar para corrimientos al rojo -z- del orden de 6 o 5[5] una meseta que más o menos se mantuvo hasta un z=1.[6] A partir de entonces se observa un progresivo declinar en el número de las estrellas. Así que habrá que pensar que el Universo andaba más revuelto en el pasado que en nuestros días.



Curva de la evolución estelar a lo largo de la vida del Universo. En la parte de arriba referenciadas al corrimiento al rojo y en la parte de abajo a la edad retrospectiva del Universo desde hoy (SFR= Star Formation Ratio) (Imagen a extraída del curso on-line "El Universo en formación", por el profesor S. George Djorgovski, CALTECH, fair use)

Pero sigamos con nuestro relato, ahora hacia los sistemas planetarios. Una galaxia espiral que nos es muy familiar es en la que vivimos, nuestra galaxia la Vía Láctea. Se formó hace 13.210 millones de años, a partir de un colapso gravitatorio. En ella nació nuestro sistema solar hace unos 5 mil millones de años, también a partir del colapso gravitatorio de una nube molecular en donde predominaba el hidrógeno neutro. En su centro se halla una estrella, el Sol. Es una estrella de población I. Estable, a la que aún le quedan por delante otros 5 mil millones de años de vida. Tiene su sistema planetario, y estamos seguros de que no es de los más viejos, ya que sabemos que

en el universo había planetas desde una época temprana. Gracias a la misión Kepler se ha encontrado el sistema planetario más antiguo conocido por ahora. Tiene 11.200 millones de años de edad, a 2.600 millones de años del Big Bang. Se trata del sistema planetario de la estrella Kepler-444, que se encuentra en nuestra galaxia a solamente 117 años luz de distancia de nosotros. Lo que sabemos por ahora nos habla de 5 planetas rocosos más pequeños que la Tierra.



Sistemas planetarios que actualmente se encuentran en formación en la Gran Nebulosa de Orión (Imagen: NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA), HST Orion Treasury Project Team y L. Ricci (ESO) CC BY 4.0)

Gracias a los nuevos telescopios como el Hubble se empieza a entender cómo se originan estos cuerpos secundarios. Este telescopio ha estudiado la Gran Nebulosa de Orión y ha obtenido unas excelentes imágenes en las que se aprecian con toda claridad multitud de protodiscos planetarios con claroscuros, resultante de la luz de su joven estrella y la opacidad del polvo que los forma. Evidentemente son el resultado de un colapso gravitatorio. Una vez más, grandes masas de gases y polvo, principalmente partículas de silicatos, carbonatos o hielo, formaron una burbuja de materia. Bajo la fuerza

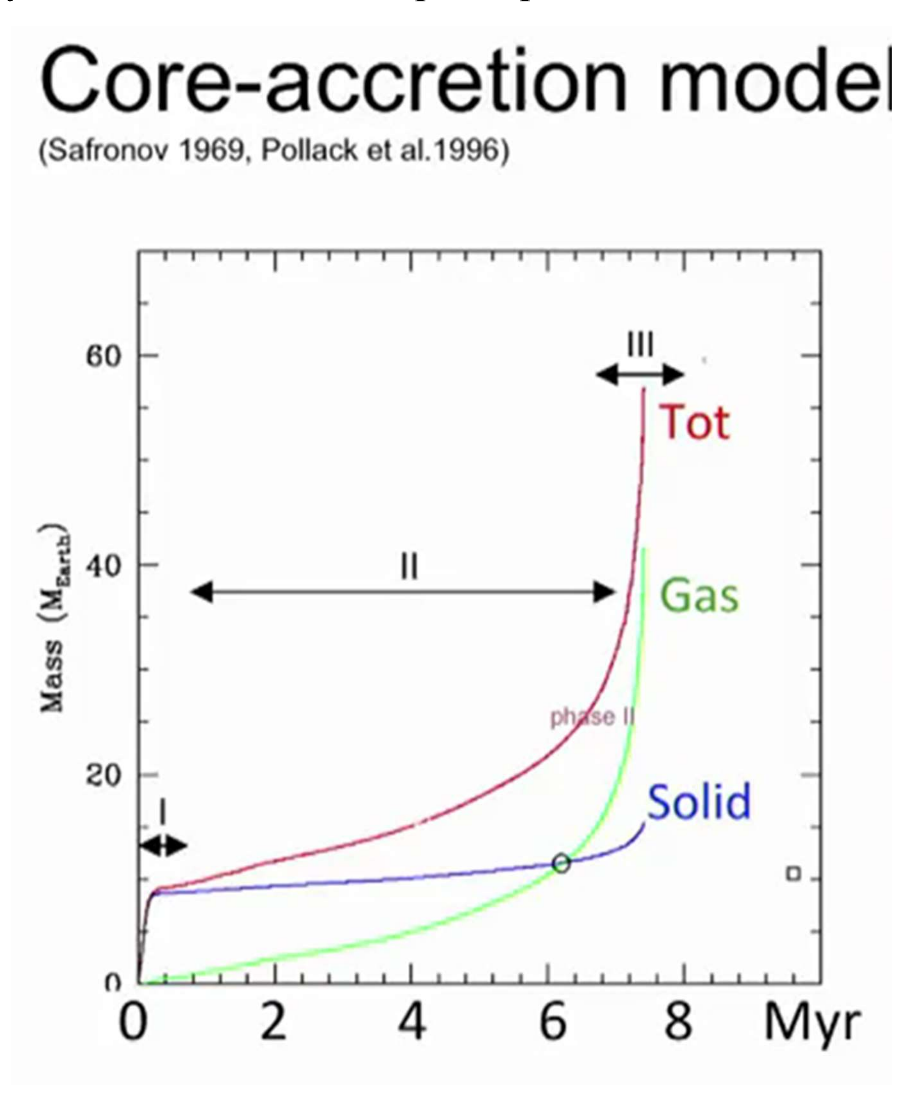
de la gravedad la burbuja comenzó a compactarse y a girar como consecuencia del mantenimiento del momento angular de sus partículas, produciéndose así el disco en cuyo centro se alumbró una estrella y donde, en las periferias cada vez más frías cuanto más alejadas de la estrella, fueron apareciendo los planetas. Se cree que estos discos planetarios tienen una estructura muy fina, con un espesor vertical mucho más pequeño que su radio, y una masa que también contrasta con la abundante acumulación en el bulbo central, que puede suponer incluso un 98 o 99% del total. Su composición es mayoritaria de gases que engloban granos de polvo que van a ser decisivos a la hora de la formación de planetas. También se cree que la parte interior del disco tiene una dinámica muy relajada, mientras que su envuelta exterior está configurada por un plasma muy turbulento.



Imagen tomada por el telescopio ALMA en Atacama, que corresponde al sistema protoplanetario HL Tauri (Wikipedia: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), CC BY 4.0)

No se sabe muy bien cuál pudo ser el mecanismo originador de los planetas en este halo estelar. Quizás no hay uno sólo. Hoy por hoy se cree que los planetas pudieron aparecer o bien por acreción del polvo en el disco, o bien por inestabilidades gravitatorias, llamémosles

remolinos secundarios, dentro del disco giratorio. Estas últimas podrían ser producidas por el paso de ondas de presión resultado de la explosión de supernovas cercanas. Los modelos estudiados indican que el primer proceso es muy lento y el segundo mucho más rápido. Y la velocidad importa, ya que lo que realmente se ve al observar el espacio es que las nuevas estrellas pierden su disco original en un periodo de 10 millones de años en promedio. Cualquier planeta que no se haya formado en este tiempo ha perdido el tren.



Modelo de acreción de planetas gaseosos (Gráfico: James B Pollack, Icarus 124, 1996, fair use)

La acreción planetaria presenta tres fases (ver imagen de arriba). La primera, con las primeras concentraciones locales -a una determinada distancia radial del bulbo central- de polvo y partículas que van barriendo el disco, de forma que se va generando un anillo específico

cada vez más limpio donde luego acabará apareciendo un solitario planeta. Esta fase puede durar hasta medio millón de años, hasta formarse en el anillo una masa sólida superior a la de la Luna, cuando el planeta ha "depredado", como hemos dicho, casi todo el material en su zona de influencia. En la segunda fase, más estable, esta masa de tamaño lunar, además de seguir barriendo polvo y partículas, atrae gas sobre su superficie, creando lo que podemos asimilar a una protoatmósfera. Esta fase es la que condiciona el tiempo de formación del planeta.

Cuando la masa gaseosa es igual a la sólida, y eso sucede más o menos cuando el planeta tiene de 5 a 20 veces la masa de la Tierra, comienza un incremento exponencial en la fijación de gas atmosférico acompañado por los últimos coletazos de captación de sólidos, iniciándose una carrera hacia la formación de planetas gigantes gaseosos del tipo jupiteriano. Esta última fase es muy rápida y tiene que acabar antes de que desaparezca el disco planetario, que como dijimos finalizará su vida en un periodo máximo del entorno de los 10 millones de años.

Cuando la proto-estrella inicia la fusión nuclear del hidrógeno o del helio que la forman, el viento de partículas resultantes[7] empuja a las moléculas más livianas del disco -como las de agua, amoniaco, metano o dióxido de carbono- hacia afuera, quedando en las proximidades de la estrella las moléculas más pesadas, tales como los silicatos o los metales. En estos sistemas se define la *línea de hielo* como aquella frontera, dentro del disco protoplanetario, en donde el calor de la estrella deja de ser suficiente como para que no se produzca la condensación de las moléculas sencillas que iba empujando el viento estelar. Más allá de esta frontera el frío hace que condensen y queden así atrapadas, congeladas, sobre las partículas de polvo del disco. Las experiencias en laboratorio muestran cómo este tipo de congelación no supone el generar hielo sólido, sino una especie de nieve porosa, lo que aún favorecería más la captura de los granos de polvo y el inicio de mayores conglomerados, que de otra manera tenderían a interactuar entre ellos con choques elásticos que

los dispersarían. De forma que la acreción gravitatoria en la parte interior del sistema iba generando planetas rocosos, mientras que en el exterior planetas gigantes gaseosos.

Llegados a este punto del relato, cuando ya han aparecido todos los actores principales, no nos queda más que explicar cómo es el escenario, cual es el ballet cósmico que representan, cómo se distribuyen a través del espacio-tiempo. Así que el siguiente capítulo lo vamos a dedicar a observar las magníficas estructuras luminosas -¡y oscuras!- que atraviesan el vacío cósmico de nuestro Universo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 28:

1) Para saber más sobre estas fantásticas fábricas de los elementos químicos recomiendo vivamente la amena lectura de la serie "*La vida privada de las estrellas*", publicada en nuestro blog hermano "*El Tamiz*".

2) A la reionización le dedicamos un capítulo específico, el número 24, en donde podéis refrescar el tema.

3) El estudio completo sobre la galaxia CR7 -y no es Cristiano Ronaldo, aunque a él a veces lo conceptúan como de galáctico- fue publicado en *The Astrophyscal Journal* de 4 de junio de 2015, con el título de "*Evidence for popiii-like stellar populations in the most luminous lyman-α emitters at the epoch of re-ionisation: spectroscopic confirmation*", David Sobral et al.

4) Este hallazgo se publicó en la revista Nature de febrero de 2014 con el título de "*A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star SMSS J031300.36−670839.3*", S. C. Keller et al.

5) Cuando la edad del Universo era de unos 1.000 millones de años.

6) Edad del Universo de 6.000 millones de años.

7) Recordad que la masa de las estrellas es un plasma de átomos ionizados, en su gran mayoría núcleos de hidrógeno -protones- e iones de helio en un perfecto chapuzón con los electrones que perdieron en su ionización. La temperatura es altísima -en el Sol,

de unos 6.000K- lo que quiere decir que las partículas más ligeras de este plasma, protones y electrones, pueden saltar al exterior e independizarse, iniciando un largo viaje a velocidades próximas a la de la luz. En nuestro sistema ellos son lo que llamamos viento solar.

Universo 29: La estructura del Universo

hoy

Con lo dicho hasta el capítulo anterior parece que ya podríamos echar el cierre a la biografía del Universo. Habían pasado más o menos 13.800 millones de años desde aquello que creemos fue una excursión cuántica desde el vacío, una inestabilidad de energía que logró escapar del principio de incertidumbre con la ayuda de la gravedad. Poco más tarde pasó por un episodio tremendamente expansivo en el que su tejido creció a velocidades mayores que la de la luz, durante el que se recargó de energía. Esta energía se convirtió en materia y radiación y aún le quedó impulso que dura incluso a día de hoy. En el camino se formaron átomos y cúmulos de materia que devinieron en galaxias y estrellas. Perfectamente ordenadas, según los patrones que fijó la inflación. La historia de nuestra Universo está acabada, pero procede explicar cuál es el grupo escultórico que podemos contemplar hoy, poso del paso dinámico de lo sucedido. Vamos a ver cuál es la estructura que el Universo presenta a nuestros ojos.



El cielo nocturno, fuera de la interferencia de la luz solar, momento en que mejor podemos apreciar la realidad de nuestro Universo. Se trata de una panorámica nocturna de la Vía Láctea vista desde la plataforma de Paranal, Chile, hogar del telescopio gigante del ESO (Wikimedia, CC BY 4.0)

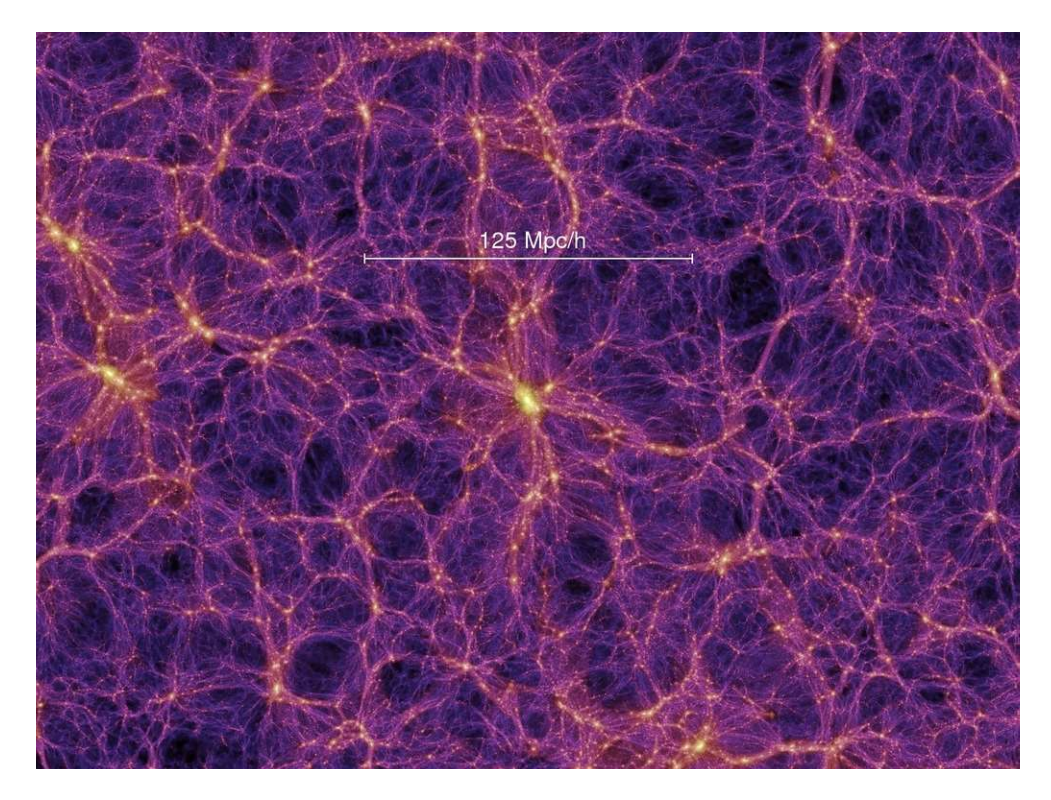
Aquí está nuestro personaje: **EL UNIVERSO**. Tamaño observable: 93.000 millones de años luz en diámetro. Temperatura media: 2,725K. Volumen observable: 1,09 x 1079 m3. Densidad de energía: 0,846 x 10-29 gr/cm3. Masa: 9,27 x 1052 kg.

Podríamos pensar que el Cosmos de hoy tendría que estar lleno de materia distribuida de forma muy homogénea. Y sin embargo, como así lo sugiere la bella fotografía anterior, somos capaces de observar que hay una estrella por aquí, un cúmulo por allá o un agujero negro por el otro lado… ¿dónde está la homogeneidad?

¡La hay!… se trata de una homogeneidad en un inmenso vacío. A pesar de que veamos mucha materia estelar en los cielos nocturnos, no deja de ser una percepción de nuestras más próximas cercanías: la Vía Láctea. Más allá de ella hay más vacío que materia, concentrada en un promedio de ¡medio protón por cada metro cúbico de un espacio mareante!

Allí, en el frío de la "nada", la materia se estructura de forma muy ramificada, dando la impresión de seguir un esquema jerarquizado: un conjunto de vacíos gigantescos, similares a una espuma de pompas de jabón, separados por láminas de mayor o menor espesor y filamentos, rosarios de cúmulos de galaxias en los que, de vez en cuando, aparece un supercúmulo, un nodo relativamente denso. Grandes Murallas, Grandes Vacíos y Grandes Atractores, una panoplia variada de realidades cósmicas.

Pero en conjunto, a escalas suficientemente grandes -del orden de más de 300 millones de años luz-, el Universo es homogéneo e isótropo. Mires hacia donde mires y desde cualquier punto que mires, verás siempre la misma estructura: la de la imagen anterior, rielada por hilachas etéreas y fantasmales. Una Santa Compaña de luminares siderales. En la distancia corta siguen unos patrones de agrupación, con una escala estándar de unos 480 millones de años luz que se repite, traslación a día de hoy del horizonte acústico dibujado en la imagen primera de la radiación de fondo. Vamos a hacer un recorrido por esas estructuras, comenzando por lo más "pequeño".



Modelo de la estructura del Universo. Así debe de ser en la realidad (Imagen: Springel et al. (2005), The Virgo Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations, fair use)

Y lo más pequeño son las **estrellas**, muchas de ellas con sistemas planetarios. Están situadas normalmente dentro de configuraciones que conocemos como galaxias. Pero en ellas suelen presentar unas subagrupaciones que conocemos como **cúmulos estelares**, que pueden ser globulares o abiertos. Los primeros son agrupaciones densas de centenares de miles o millones de estrellas de más de mil millones de años de edad, mientras que los cúmulos abiertos son más inestables y contienen generalmente centenares o millares de estrellas más jóvenes. Eso sí, como toda clasificación, tiene sus excepciones. Los cúmulos estelares ayudan a comprender la evolución estelar, ya que no dejan de ser agrupaciones de estrellas formadas en la misma época a partir del material de una nube molecular.

Tras las agrupaciones estelares debemos seguir por las **galaxias**, refugio de cientos de miles de millones de astros y de sistemas planetarios. Tienen formas geométricas muy variadas, pudiendo adoptar una geometría espiral -entre ellas también las hay anulares-, elíptica -o globular- e incluso irregular. Tienen un tamaño variable,

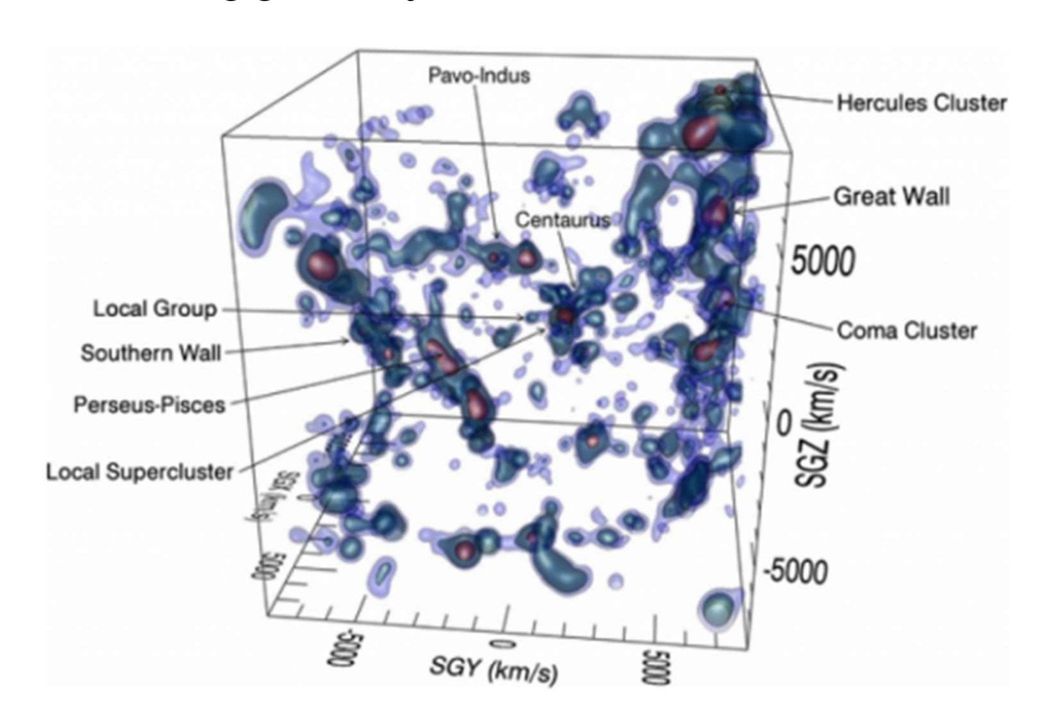
entre unos cientos y algunos millones de años-luz de diámetro. La más pequeña que conocemos es M60-UCD1, con 160 años-luz de diámetro y la más grande, IC 1101 de Virgo, con 5,5 millones de años-luz de diámetro.

Las galaxias están ligadas gravitatoriamente entre sí, formando estructuras de orden superior a las que conocemos como **agrupaciones galácticas**. Las hemos clasificado en tres tipos, dependiendo de su tamaño y el número de galaxias que contienen. Así tenemos los pequeños (a) *grupos*, con unas decenas de galaxias y tamaños de unos 6 millones de años luz. Les siguen por tamaño los (b) *cúmulos,* que pueden agrupar desde 50 a 1.000 galaxias, dentro de un gas caliente emisor de rayos X y con gran cantidad de materia oscura que condiciona decisivamente su dinámica. Su tamaño estándar es de unos 24 millones de años luz. Más grandes aún son los (c) *súper cúmulos*, en cuyos tamaños se diluyen el de las galaxias, siendo sus unidades más elementales los grupos y los cúmulos galácticos.

Enfoquemos la mirada en nuestro caleidoscopio hacia unos ejemplos que nos ampliarán el conocimiento de estas estructuras. Por la evidente curiosidad que produce en nosotros, los habitantes de la Tierra, qué mejor que hablar de nuestro universo más próximo. Nosotros vivimos en un lugar irrelevante dentro de todas estas estructuras. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, deambula por el **Grupo Local**, que está dominado por tres matriarcas, tres galaxias espirales gigantes: Andrómeda, la propia Vía Láctea y la Galaxia del Triángulo. El resto, unas 30, son más pequeñas, siendo muchas de ellas galaxias que giran alrededor de una de las mayores. El conjunto orbita alrededor de un punto situado entre Andrómeda y nuestra galaxia.

El Grupo Local deambula perdido dentro del **Cúmulo de Virgo**, en el que hay una mezcla heterogénea de galaxias espirales y elípticas que posiblemente suman hasta un número de 2.000. Se cree que dentro del cúmulo la distribución de las de tipo espiral adquiere la forma de un filamento que es aproximadamente cuatro veces más

largo que ancho; mientras que las galaxias elípticas se encuentran más concentradas en el centro del cúmulo. Su estructura interna es muy variopinta, ya que agrega varios subgrupos diferentes, algunos de ellos en proceso de fusión. Además, también tiene muchas galaxias satélite situadas relativamente cerca, que seguramente en el futuro acabarán por ser definitivamente atraídas por la gravedad del Cúmulo de Virgo. El medio intergaláctico está formado por un plasma a muy elevadas temperaturas en donde se encuentra, además de un número relativamente elevado de estrellas -incluso formando cúmulos globulares-, nebulosas planetarias formadas por plasma y gas ionizado, expulsados en los últimos momentos de la vida de estrellas gigantes rojas.



Resultado de modelizar las velocidades y distancias de las galaxias del Universo cercano. Las burbujas de colores agrupan a la mayoría de galaxias mientras que el resto es mayoritariamente vacío. Las distancias están en Km/seg, sólo basta dividir por la constate de Hubble para obtenerlas en millones de parsec (x 0,013 a Megaparsec, x 0,043 a Megaños luz). La anchura del cubo es de casi 700 millones de años luz. Nosotros estamos en el mínimo Local Group central (Imágenes: Hélène M. Courtois et al., fair use)

Demos un paso más en la escala de tamaños en nuestro universo local. Galaxia Vía Láctea, Grupo Local, Cúmulo de Virgo y… ¡cómo no! El **Supercúmulo de Virgo**, o Supercúmulo Local, que contiene a todas las anteriores y mucho más: hasta 100 grupos y cúmulos de galaxias. Nuestro Grupo Local está localizado en las afueras de este supercúmulo, en un pequeño filamento que se extiende desde el Cúmulo de Fornax al Cúmulo de Virgo, posiblemente dentro de otro supercúmulo, el de Laniakea, que se encuentra junto al de Virgo.

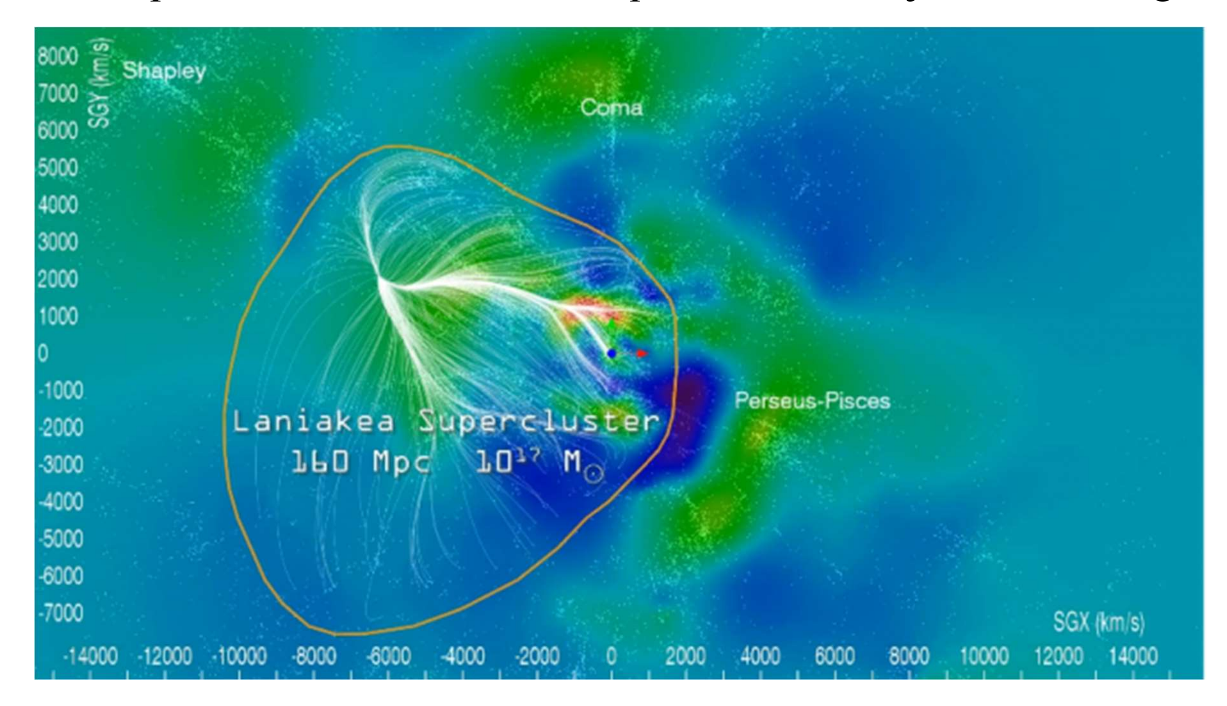


Imagen de la simulación explicada en el texto que permite definir las fronteras de un grupo local de influjo gravitatorio independiente, Laniakea. Su tamaño viene a ser de unos 12.000 km/seg, lo que equivale a unos 520 millones de años luz. La Vía Láctea se encuentra en el punto azul central. (Imágenes: [1] R. Brent Trully et al., fair use)

Laniakea parece ser una realidad cada vez más evidente. La base de esta mayor certeza la encontramos en las cada vez más sofisticadas técnicas de análisis que nos ofrece la tecnología. Hoy en día comienza a ser habitual analizar la dinámica del movimiento de galaxias y cúmulos en simulacros 3D. La idea es muy sencilla: Cada día los astrónomos disponen de catálogos de galaxias más completos y hasta distancias más lejanas. Los catálogos recopilan todo tipo de

información, entre otra, el lugar de la galaxia con respecto a nosotros y la velocidad de alejamiento con respecto a nosotros. Procesando estos dos datos se puede obtener la densidad local de galaxias en el Universo y la velocidad real de movimiento de cada una de ellas sobre el campo de referencia que suponen los fotones de fondo en microondas. Todo ello permite a los astrónomos determinar la forma geométrica de los campos de potencial gravitatorio y de velocidades, así como las líneas de flujo de movimiento de las galaxias por el Universo. La imagen anterior, nuestro particular supercúmulo de familia, es uno de los resultados espectaculares de este tipo de estudios (recomiendo el vídeo al que dirige la nota en la leyenda de la figura anterior). Con estas técnicas se ha logrado detectar un patrón de densidad y flujos de movimiento local que permiten definir un entorno con su particular interrelación gravitatoria, que corresponde a lo que hemos nominado como Laniakea.[2]

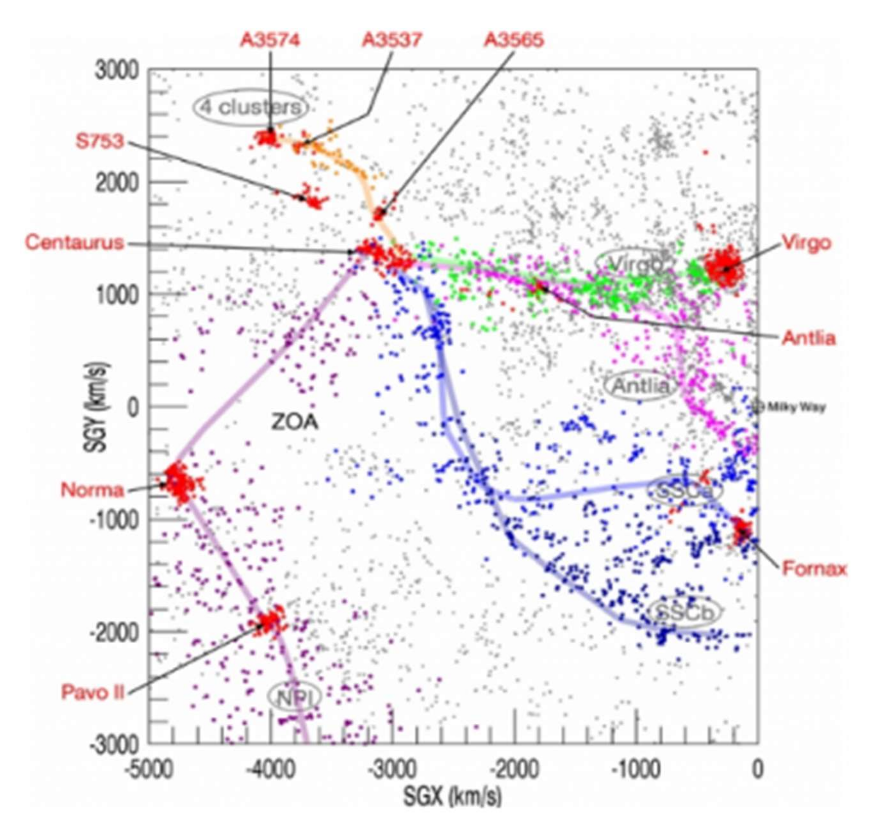


Imagen anexa a la de la página anterior, en donde se aprecian los filamentos” en que están preferentemente orientadas las galaxias de Laniakea y sus sendas de movimiento (Imágenes obtenidas de este vídeo, R. Brent Trully et al., fair use)

En la “foto” de Laniakea (pg. 299) vemos a sus compañeros cósmicos, los supercúmulos de Shapley, el de Perseo-Piscis y el de Coma. La línea naranja es la frontera de Laniakea, que encierra zonas verdes con densidad de galaxias y zonas vacías en azul. La Vía Láctea, nuestra galaxia, se encuentra en el punto azul central. Las líneas blancas son las líneas de flujo en los movimientos de las galaxias, que van dirigidas en el sentido del atractor de la parte superior del supercúmulo y que coincide con el cúmulo Centauro. Merece la pena resaltar que hay una serie de “filamentos” en donde se concentran preferentemente las líneas de flujo. Realmente equivalen a zonas longitudinales en donde se densifican las galaxias. En particular, hay cinco de estas autopistas: la nuestra corresponde a la de Virgo.



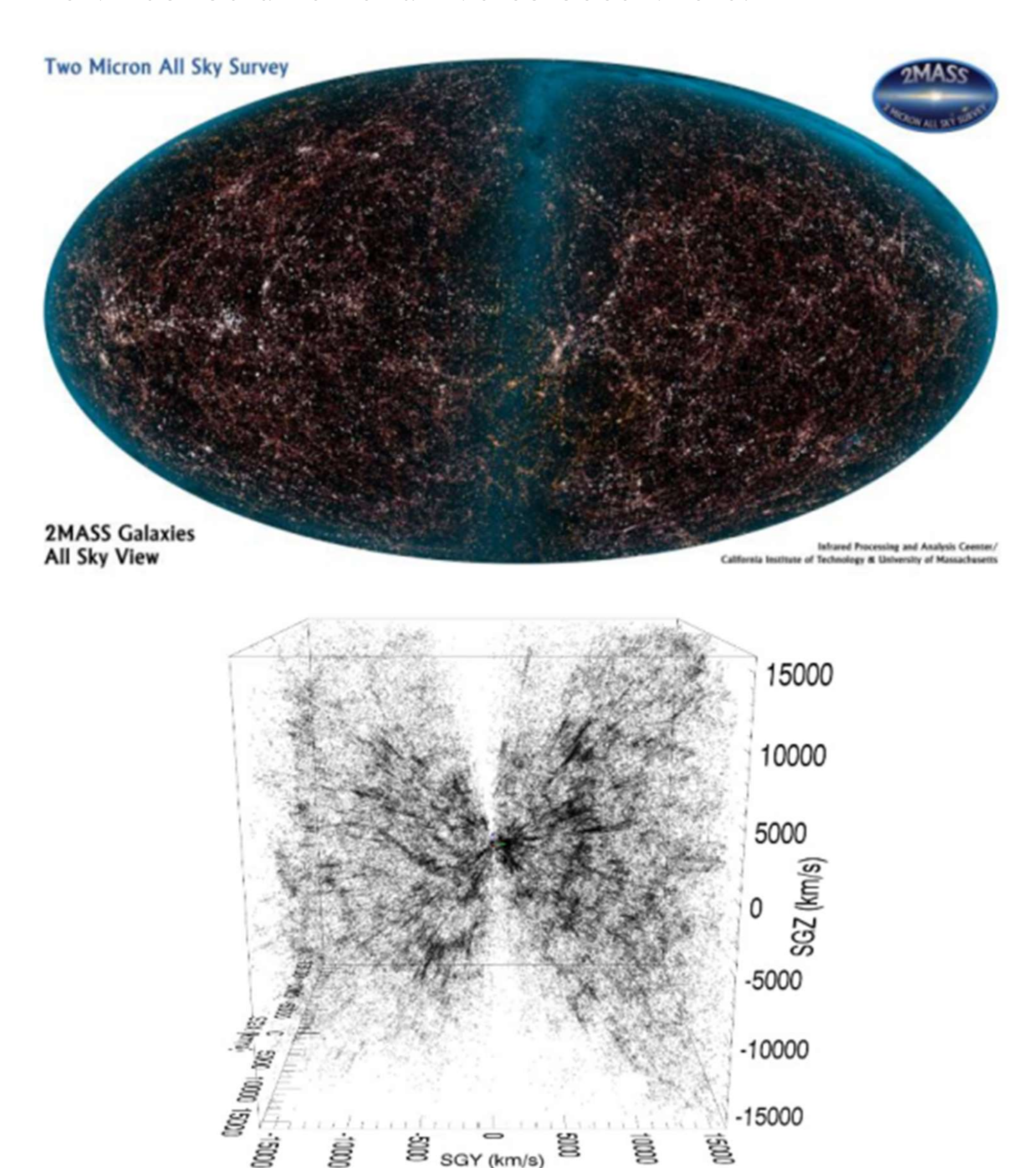
Laniakea no es tan “bestial” como jocosamente apunta el texto, simplemente es una mota perdida en la inmensidad del Universo observable. La cuestión de que esté en el centro no tiene nada que ver con una visión antropocéntrica… es que realmente, por definición, estamos en el centro del Universo observable (Wikimedia: imagen de J.A. Galán Baho, CC BY-SA 4.0)

Este supercúmulo de Laniakea es uno entre millones de supercúmulos en la extensión del Universo observable. Se cree que así como los cúmulos se agrupan en supercúmulos, en las escalas más grandes del universo visible los supercúmulos se agrupan asimismo en **filamentos** galácticos, también llamados **hipercúmulos** -complejos de supercúmulos- o en grandes **murallas** -más delgadas y planas que los filamentos-, que están rodeados de vacíos a modo de enormes burbujas huecas, conocidas como **gotas Lyman-α**.[3] Se trata de enormes nubes de gas hidrógeno, del tamaño de varias galaxias, que emiten fuertemente en la línea de emisión Lyman-α del hidrógeno. Pueden formar agrupaciones con un tamaño de hasta 200 millones de años luz.

En el conjunto de toda esta inmensa red cósmica de hilos, paredes y vacíos, los supercúmulos hacen de nodos de la tela de araña, aunque quizá sea mejor asimilar este entramado a unas esponjas de más de mil millones de años luz. En esta esponja nuestro supercúmulo Local, junto con el supercúmulo Hidra-Centauro, forma una de las cinco partes que integran el Complejo de supercúmulos Piscis-Cetus. A este último se le estima un tamaño de alrededor de 1.000 millones de años luz de largo y 150 millones de años luz de ancho, siendo una de las mayores estructuras identificadas hasta ahora en el universo. El complejo está compuesto por cerca de 60 supercúmulos y se estima que tiene una masa total de 10^{18} masas solares.

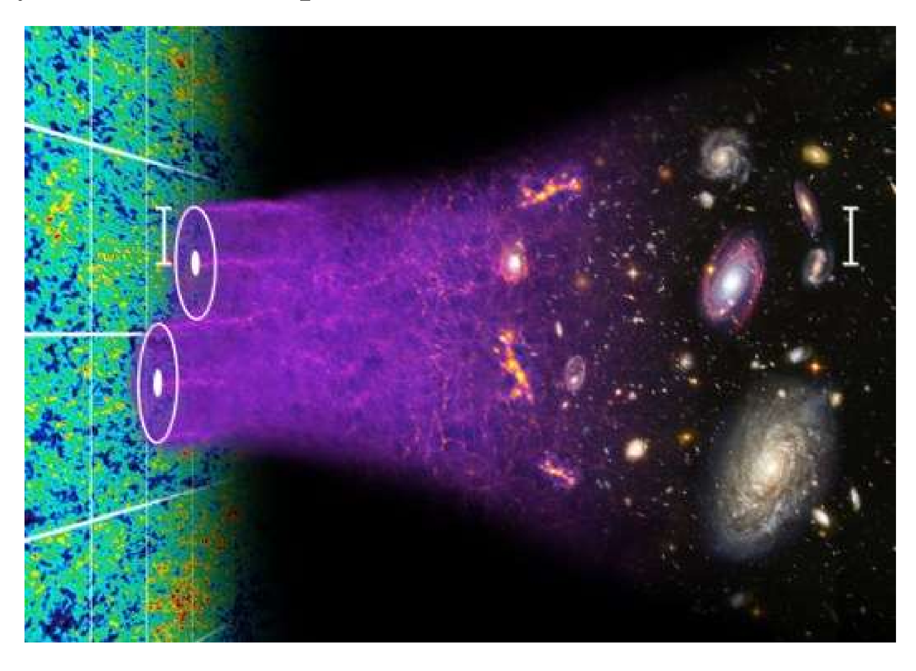
Tamaño monstruo es superado por los más de 1.370 millones de años luz de la Gran Muralla Sloan, que está situada a una distancia de mil millones de años luz de la Tierra. Pero no os asustéis, que hay más: U1.11 es un grupo de cuásares -hasta 38- con un tamaño aparente de 2.550 millones de años luz. Quizás penséis que U1.11 os va a hacer caer de espaldas al suelo y que ya no hay más… ¡Pues no! La **Gran Muralla** de Hércules-Corona Boreal, a la que también se le conoce por Complejo de Supercúmulos de Hércules-Corona Boreal, es una… ¡no hay adjetivos!, inmensa superestructura de galaxias. Su estructura es un filamento galáctico formado por un gigantesco grupo de galaxias asociadas por la gravedad. Tiene cerca de 10.000 millones

de años luz en su mayor dimensión -que representa aproximadamente un noveno del diámetro del universo observable- por 7.200 millones de años luz en la otra. Lo que constituye la estructura más grande y más masiva conocida en el universo observable.



Representación plana (arriba) y 3D (abajo) de las estructuras de nuestro Universo. Cada punto es una galaxia. La franja azul arriba -o la zona blanca en el 3D- corresponde a la "sombra" de información producida por nuestra Vía Láctea. El campo de representación abajo es un cubo de 1.300 millones de años luz. La información proviene de la base de datos 2 Micron All Sky Survey[4] (Imagen izquierda: NASA, CC BY 4.0. Imagen abajo: R. Brent Trully et al., fair use)

Pero, si a pesar de todas estas estructuras masivas seguimos diciendo que el universo es homogéneo a grandes escalas, es porque hay más vacío que materia. En nuestras esponjas cósmicas hay más huecos que paredes. Y se les conoce como **Vacíos**, en donde encontramos muy pocas galaxias. O quizás ninguna. Los vacíos más grandes, los supervacíos, están situados en los espacios de baja densidad del Universo y pueden ser de unos tamaños del entorno unos pocos centenares de millones de años luz. Se cree que los vacíos se formaron en los procesos de las ondas acústicas generadas tras el Big Bang. Recordad del capítulo 18 cómo la masa bariónica en el plasma primordial era desalojada de los pozos gravitatorios de la materia oscura por la gran presión de la radiación, y vueltos a recuperar en parte por la misma materia oscura. En los movimientos de impulsión y colapso de estas masas de materia bariónica se produjeron las semillas de los vacíos. Lo que observamos ahora es el exterior de aquellos huecos primordiales rodeados de materia, que quedaron congelados en el momento del reagrupamiento de núcleos y electrones y que la expansión continua del universo nos ha traído hasta hoy en forma de superestructuras.



De las arrugas cuánticas en el plasma original a la arquitectura de las estructuras actuales del Universo (Imagen: Chris Blake y Sam Moorfield, fair use)

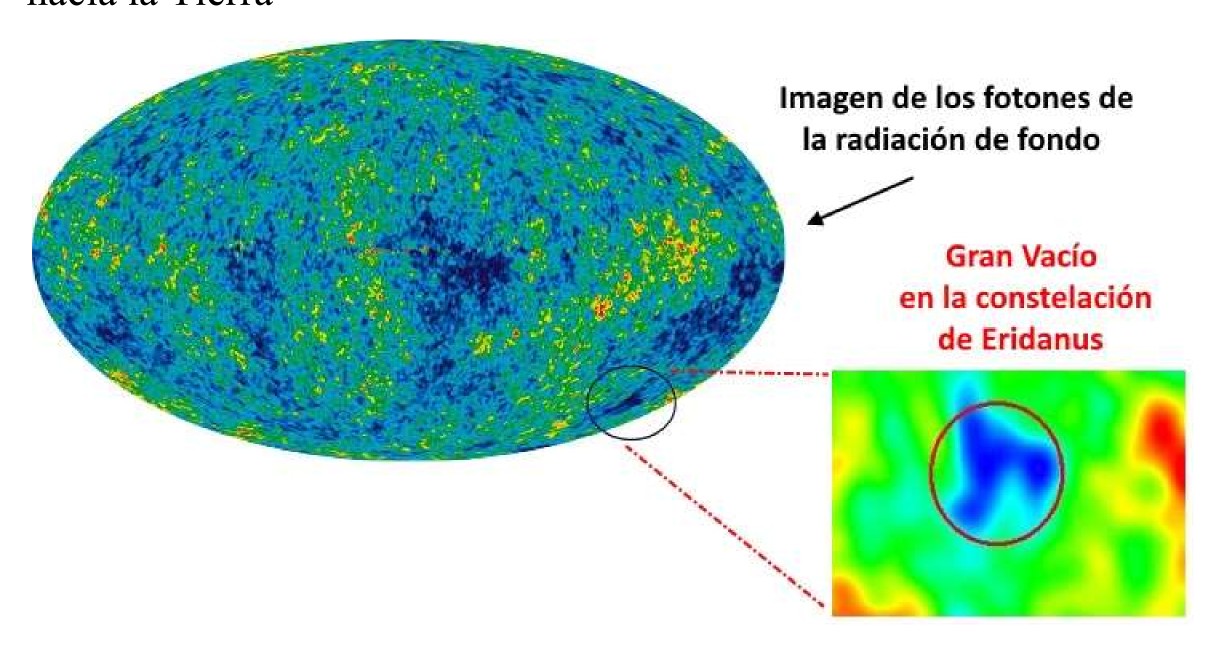
Justo en las cercanías de nuestro Grupo Local tenemos al **Vacío… Local**, ¡cómo no! Es de tamaño medio, a pesar de que tenga unas dimensiones, según en la dirección donde se mida, de unos 230 a 150 millones de años luz ¡Y sus paredes se abren a una velocidad de 260 kilómetros cada segundo! Como podréis imaginar, un derroche de "nada" … aunque no del todo. Porque no le llega a la altura del zapato al **Vacío Gigante**, una burbuja de 1.000 o 1.300 millones de años luz de diámetro, dentro de la cual hay una región esférica de unos 160 millones de años luz de diámetro en donde andan "flotando" hasta 17 cúmulos de galaxias que, dada la baja densidad del "agujero", no interactúan gravitatoriamente entre ellas. Por eso lo de "flotando". No se acaba aquí las megalomanías del Cosmos. En 2013 se publica la existencia de algo aún más grande, una gran esfera de baja densidad de unos 2.000 millones de años luz de diámetro, a la que, en honor a sus descubridores, se le llama **Vacío KBC**.[5] Nos cabe el honor de que vivimos en ese vacío.

¿Será KBC el fin de la lista? No creo… la película puede continuar porque el Universo no dejará nunca de sorprender a los humanos.

Vamos a acabar esta descripción del museo de las cosas terroríficas - sí, ya sé que no son terroríficas, pero sus magnitudes me sobrecogen- con dos últimas curiosidades que nos regala la observación de nuestro Cosmos. Son aspectos muy particulares pero que nos permiten ver la riqueza de formas con que nos lega la dinámica del Universo. Y quién sabe si estas formas particulares no son tan *particulares* y se repiten a lo largo y ancho del espacio.

La primera se trata del **Supervacío de Eridanus**, o Punto Frío del WMAP o del CMB, que tiene unos 1.000 millones de años luz de diámetro. Con estos nombres podríais imaginar que es "algo" puesto en el escaparate del mapa de la radiación de fondo de microondas -y así aparece en su fotografía-. Se trata de una región del Universo que, tras su análisis, resultó ser extraordinariamente grande y fría en relación con las propiedades esperadas de la radiación de fondo de microondas (CMB). Primer misterio: Las fluctuaciones térmicas de

la CMB -con temperatura promedio de 2,7K- son de aproximadamente 10^{-5}K y la temperatura de dicho supervacío es de 70 μK, mucho más frío que dicho promedio. Segundo misterio: el supervacío abarca unos 5º en el cielo, siendo así que generalmente la mayor de las fluctuaciones primordiales de temperatura del CMB se produce con escalas angulares de alrededor de 1°. El Vacío de Eridanus no encaja bien en nuestros modelos teóricos. Hay dudas y se especula que bien pudiera ser causado por algo más cercano, algo que se interpone en el camino de los fotones de fondo en su viaje hacia la Tierra



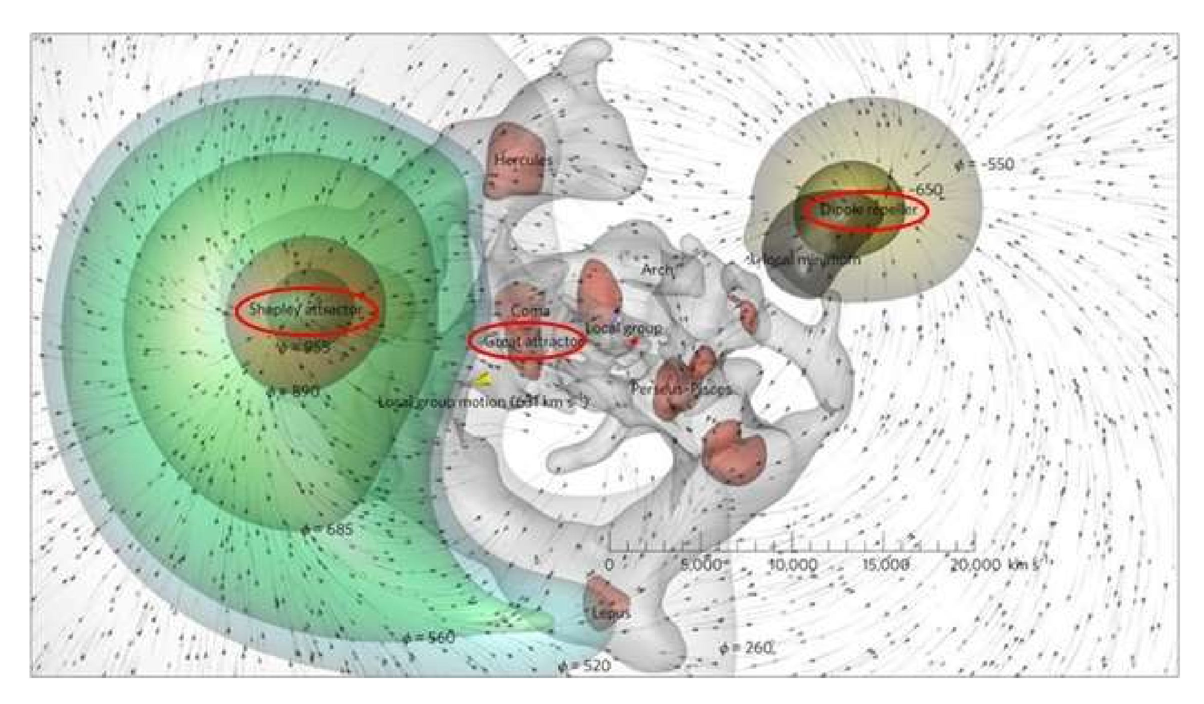
El Gran Vacío localizado sobre la imagen de los fotones de la radiación de fondo de microondas (Imagenes: izquierda WMAP Science Team, NASA, CC BY 4.0, derecha Wikimedia, dominio público)

Por último, vamos a hablar de algo realmente inquietante. Tras el gran Supervacío de Eridanus creíamos que en el Universo no podía haber nada más absoluto y misterioso… pero nos equivocamos. Los sudores fríos de vértigo se apoderan de nuevo de nosotros ante estas dos palabras: **Gran Atractor**. Pero que no cunda el pánico. No es tan misterioso como parece, ya que creemos que no deja de ser más que el mero resultado de la atracción gravitatoria producido por "algo" de masa equivalente a una concentración de decenas de miles de galaxias.

Nuestro Grupo Local de galaxias se mueve con respeto al fondo cósmico de microondas a una velocidad de 631 ± 20 km /seg. Desde hacía tiempo se sabía que algo había en el centro del Supercúmulo de Virgo que arrastraba a las galaxias inmersas en una región de millones de años luz. Observábamos que se alejaban de nosotros, lo que podía ser debido al conocido desplazamiento implícito en la expansión del espacio-tiempo. Pero se llegó a pensar que también podía ser debido a la atracción gravitatoria de una desconocida gran masa de materia, ya que más allá, como si se tratara de una región diametralmente opuesta, hay galaxias cuya luz presenta un corrimiento al azul, lo cual quiere decir que se están acercando a nosotros. La cosa no estaba muy clara, dado que el posible centro atractivo se escondía detrás del halo de nuestra galaxia, oculto por su denso disco de polvo, gases y estrellas.

Pero la tecnología llegó en nuestra ayuda. Fuimos capaces de mirar más allá de lo que se podía hacer con las frecuencias del espectro de lo visible para nuestros ojos y aprendimos a mirar con visión de rayos X. La luz visible no pueda atravesar las nubes de gas y polvo que rellenan las galaxias, pero sí que pueden hacerlo los rayos X. Así que nos pusimos a mirar en esta frecuencia hacia la zona donde se sabía debía estar el misterioso centro de atracción. El análisis reveló que en la región donde debería estar el Gran Atractor, entre 150 y 250 millones de años luz lejos de nosotros, hay una estructura dominante, un cúmulo de galaxias unas mil veces más masivo que la Vía Láctea, que conocemos como Cúmulo de Norma y que justifica un 10% de la teórica masa del Gran Atractor.

Pero aún hubo más sorpresas. A pesar de la superlativa masa del Cúmulo de Norma y del Gran Atractor, ellos solos no podían explicar el movimiento de las galaxias hacia el centro de atracción, cualquiera cosa que fuera este centro. Incluso cuando se miraba “más lejos”, a mayores escalas dentro del espacio, se veía que incluso el Gran Atractor se movía en dirección a algo que tenía que ser incluso más masivo. Algo pasaba que nos era desconocido.



Modelado de las estructuras del Universo -en donde se encuentra el ***dipolo atractor-repeledor*** *de Shapley- dentro de un rango de 2.500 millones de años luz. Las flechas indican el campo de velocidades de desplazamiento de las galaxias. En rojo y gris los nudos y filamentos de la red de estructuras respectivamente. En verde y amarillo las superficies de isopotencial gravitatorio, que incorporan en amarillo al repeledor del dipolo y en verde al atractor de Shapley. Un punto rojo en el centro corresponde a la posición de la Vía Láctea (Imagen: Yehuda Hoffman et al., Nature (enero 2017), fair use)*

Y la causa de la sorpresa se desveló. El mismo estudio en las frecuencias de rayos X nos dijo que en esa misma dirección, a 650 millones de años luz, existe otro gigantesco cúmulo de galaxias que tiene una masa equivalente a unas 1016 masas solares. A este grupo de galaxias se le bautizó como el supercúmulo de Shapley. Y aunque ya sabemos que el Complejo de supercúmulos Piscis-Cetus tiene una masa cien veces mayor que Shapley, hay que reconocer que este último no está del todo mal. Se trata de la más grande concentración de galaxias en el universo cercano que forman todas ellas una familia de interacción gravitacional, lo cual implica que las galaxias se atraen entre sí en lugar de expandirse con el universo. El análisis de los datos obtenidos sugiere que sólo el 44% de la aceleración que sufre nuestra

galaxia en esta dirección es el resultado del tirón gravitatorio de las galaxias que se encuentran en los dominios de Gran Atractor, y que lo que realmente está tirando de todo nuestro vecindario cósmico es el Supercúmulo de Shapley, que está a su vez ayudado por la acción misteriosa de repulsión de una zona de baja densidad, el Dipolo Repeledor, que se encuentra más o menos en sentido contrario y a una distancia parecida.[6] De forma que la atracción de uno es semejante a la repulsión que ejerce el otro.

La atracción egocéntrica de Shapley parece insinuarnos una fuerza singular, en donde todo se va a sublimar en un punto que concentre el recuerdo de lo que pasó. No hay más, y es la excusa adecuada y perfecta para plantear el hito final de nuestra historia. Desde un planeta como la Tierra a una gran muralla; desde la distancia de Plank a la inmensidad de un incompleto Universo observable; desde hace 13.800 millones de años a hoy en día; desde el vacío cuántico a 10^{-29} gr/cm^3 de densidad de energía, … la maravillosa historia del Cosmos que, gracias a la sorprendente curiosidad de unos hombres, cuyo cerebro de kilo y medio sonríe ante la visión de los estratosféricos $9{,}27 \times 10^{52}$ kilos de materia del Universo, se nos ha permitido conocer.

Aquí sí es el fin. El fin de una historia de hechos físicos -a veces la ignorancia nos dice que también puedan ser matemáticos- pero que tiene más poesía que la que surge espontáneamente al contemplar el mar de luces cósmicas en la noche.

“Solo el cielo sabe por qué lo amamos tanto”

(Wirginia Woolf)

Cuando volvamos a elevar la mirada a la profundo bóveda celeste ya no nos vamos a conformar con ver simplemente lo que nuestros ojos aprecian. Pensaremos que todo un piélago de materia desconocida para nosotros, la materia oscura, nos contempla. Cerraremos unos

instantes nuestros párpados e imaginaremos la gran nube negra que rodea a cada punto luminoso, sin la que éste no existiría. Un mar aún mayor de energía oscura que tira y tira dilatando las carnes del soporte de nuestras existencias. Unos océanos de fuegos y gases respondiendo a unas sencillas leyes que dibujan belleza en la oscuridad. Un misterio de la duda ante lo inabarcable. Ante esa contemplación espero, estoy seguro, que viviréis un momento mágico lleno de emociones y cargado de belleza.

NOTAS DEL CAPÍTULO 29:

1) Imágenes obtenidas de este interesante vídeo de R. Brent Trully et al.:
[https://www.youtube.com/watch?v=No0omeHIxwo]

2) Este supercúmulo de galaxias, Laniakea, ha sido definido en septiembre de 2014 por un equipo de astrónomos de la Universidad de Hawái liderados por Brent Tully. De ahí que no nos sorprenda su nombre, que significa en hawaiano "*Cielos inconmensurables*" y que fue propuesto por David Nawa'a Napoleón, profesor de lengua hawaiana en la Universidad de Hawái, en honor de los navegantes polinesios y su conexión con el firmamento.

3) Hablamos con un poco de detalle de las líneas Lyman-α en el capítulo 24 dedicado a la Reionización.

4) Para saber un poco más sobre esta catalogación de objetos astronómicos podéis acudir al enlace que os propongo, que os lleva a una página de la Universidad Caltech específica del proyecto 2MASS:
[http://www.ipac.caltech.edu/2mass/]

5) Las iniciales de los tres astrofísicos, R. C. Keenan, A. J. Barger y L. L. Cowie, que publicaron su descubrimiento en la revista "*The Astrophisical Journal*" de septiembre de 2013.

6) Realmente se encuentran a 16,000 ± 4,500 km/s uno del otro. Puede sorprender unidades de velocidad para fijar una distancia. Se usan en astronomía pensando en que son unidades equivalentes

a la velocidad de Hubber. Para pasar de unidades “velocidad” a unidades “distancia” hay que multiplicar por la inversa de la constante de Hubber (seg*-1). En esas unidades 100 km/seg son aproximadamente 4,66 años luz. De forma que el Gran Atractor y el Dipolo Repeledor están tan “cerca” como 746 ± 210 años luz.

30: Epílogo.

Queridos amigos, llegó el momento de despedirnos de nuestro Universo, al menos de su biografía. No se me ocurre mejor final que traer a escena a un hombre que ha sido para muchos el impulsor de nuestra afición por tan asombroso escenario.

La siguiente fotografía se conoce como *"Pale Blue Dot"* -el punto azul pálido- y aunque cueste creerlo, el "gran" personaje de la escena es la Tierra,[1] el pequeñísimo casi imperceptible punto blanco apuntado por la flecha, casualmente en el centro de uno de los rayos de luz dispersos como resultado de tomar la imagen tan cerca del Sol. Fue tomada por la nave espacial Voyager 1 el 6 de julio de 1990 desde una distancia de más de 4 mil millones de millas.



Aquí ha pasado todo lo que le ha sucedido a la humanidad, desde lo más pequeño a lo más grande… un insignificante lugar en un inabarcable océano… como nos dijo el gran Carl Sagan…[2]

... "Desde este lejano punto de vista, la Tierra puede no parecer muy interesante. Pero para nosotros es diferente. Considera de nuevo ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestra casa. Eso somos nosotros. Todas las personas que has amado, conocido, de las que alguna vez oíste hablar, todos los seres humanos que han existido han vivido en él. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, miles de ideologías, doctrinas económicas y religiones seguras de sí mismas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada niño esperanzado, cada inventor y explorador, cada profesor de moral, cada político corrupto, cada "superestrella", cada "líder supremo", cada santo y pecador en la historia de nuestra especie ha vivido ahí —en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol." **Carl Sagan**

A pesar de su nimiedad, grandes hombres en ella nos han ayudado a abrir los ojos. No nos queda más que decirles ¡GRACIAS!

Cumplido este obligado, al menos para mí, homenaje, volvamos a nuestro relato bibliográfico. El Universo, nuestra realidad más auténtica, en donde cohabitan y se interrelacionan en el infinito las ciudades cósmicas, nuestros barrios y casas galácticos. Con qué familiaridad hablamos de la Vía Láctea, del Sistema Solar y de la querida Tierra. El anterior capítulo de este libro fue realmente el última de la "*Biografía del Universo*". Desde aquel día de la publicación del primer capítulo (realmente, la primera entrada) en nuestro querido blog de "*El Cedazo*", el 18 de febrero de 2017, hemos podido tener la oportunidad de entrar en contacto e intercambiar opiniones a través de 28 capítulos más.

Espero que después de este largo viaje de más de un año hayamos podido desvelar los misterios de la vida del Cosmos, desde el hipotético Big Bang, cuna cuántica del recién nacido, hasta el escenario de hoy en día cuya contemplación nos deja embelesados. Viajamos por una expansión más rápida que la luz, buceamos en un

plasma primordial viendo cómo iban emergiendo fuerzas y partículas físicas, escuchando como sonaba la música ambiental de las ondas sonoras en el revuelto ruedo. Vimos el flash que liberó a los fotones primordiales que aún vuelan disciplinados, cada vez con menor energía, a nuestro alrededor. No tan misteriosamente la materia que nos conforma se iba congregando gracias al poder gravitatorio de fuerzas medianamente oscuras, a la par que el tejido que sustenta la obra de teatro iba creciendo y embalsando cantidades ingentes de energía. Hasta llegar al año 13.800 millones… que con otro origen de coordenadas temporales nosotros conocemos como “2018 de nuestra era”. Las estructuras que observamos a simple vista, y gracias a la cada vez más favorable tecnología, parecen estáticas aunque realmente siguen bailando ininterrumpidamente bajo la batuta de las leyes físicas. El Universo de hoy es un universo joven y nosotros estamos en él en un momento muy favorable para poder observarlo. No todo va a seguir igual. No hace tanto que cambió el signo de la expansión al dominar la energía oscura a la gravedad. Todo aún parece muy cerca como para poder estudiarlo… cercanía que se va a ir desvaneciendo con los millones de años venideros, cuando la materia se irá desgranando, separándose, reconvirtiéndose hacia sus esencias más básicas, para morir en un mar de energía muy fría. O eso creemos.

No voy a hablar de su futuro, pues a mis propósitos e interés me parece irrelevante lo que pueda pasar ya que, como digo, hay muchos boletos para que este futuro sea largo y gélido, el Big Freeze. Aunque también se contemplan otras caídas del telón mucho menos probables, sin duda intelectualmente tan estimulantes como el Big Freeze, desde un colapso rápido a una rotura de magnitud cósmica, nunca mejor dicho, del tejido del Universo.[3] En cualquier caso estamos hablando de un futuro distante de nosotros en una cantidad de años igual a una potencia de 10 elevado a un 1 seguido de… (no me atrevo ni a poner el número de ceros, pero una barbaridad inimaginable para el menguadito hombre que soy).

Nuestro Universo que me merece la pena es el de aquí y ahora, el mío, el que puedo disfrutar e investigar. Éste que hizo levantar los ojos al primer homo con suficiente consciencia para sentirse agradecido por el retornar diario del sol, el que produjo un temor reverencial como para ver en él a sus dioses, el que propició la necesidad de inventar cosmologías a todos los pueblos antiguos, el que motivó a los sumerios y egipcios a su estudio, el que hizo vibrar en el alma de Pitágoras la idea de la armonía de las esferas… en definitiva, el que causó asombro a tantos y tantos estudiosos, Copérnico, Galileo, Newton, Einstein, Hubble, Guth… y muchos más que me dejo en el tintero, una infinita lista, hombres que admiramos porque nos regalaron su asombro hasta extremos que sin ellos nunca hubiéramos alcanzado. Termino.

Y al igual que no lo he hecho al principio de este capítulo con las sobrecogedoras palabras de Carl Sagan, tampoco aquí me resisto a dejar de proponeros las emotivas palabras de Isaac Asimov[4] encontrando poesía más allá de donde el poeta no supo verla.

Esas son las palabras de Asimov:

"Uno de los poemas más conocidos de Walt Whitman[5] *es este:*

> 'Cuando escuché al **letrado astrónomo**,
>
> cuando las pruebas, las figuras, oscilaban en columnas ante mí,
>
> cuando me mostraron los gráficos y diagramas para sumarlos, dividirlos, medirlos,
>
> cuando sentado escuché al astrónomo con muchos aplausos en la sala de conferencias,
>
> cuán pronto inexplicablemente me sentí cansado y hastiado, hasta que me escabullí de mi asiento y me fui a deambular solo,
> en el húmedo y místico aire nocturno,
>
> y de tanto en tanto**, levantaba la vista en perfecto silencio hacia las estrellas**.

Imagino que muchas personas al leer estas líneas se dirán a sí mismos exultantes:

¡Cuánta verdad! ¡La ciencia absorbe belleza de todo lo que nos rodea, reduciéndolo a números, tablas y medidores!

¿Para qué molestarse en estudiar toda esa basura cuando puedo simplemente salir y contemplar las estrellas?'

Este es un punto de vista muy práctico ya que hace no solo innecesario, sino francamente mal visto, intentar entender todas esas cosas difíciles de la ciencia. En su lugar lo mejor es echar una ojeada al cielo nocturno, recibir una dosis rápida de belleza y salir hacia una discoteca.

El problema es que Whitman hablaba sobre cosas que no conocía, pero el pobre no conocía nada mejor. No niego que el cielo nocturno sea precioso. Yo también he pasado tiempo tumbado en la ladera de una colina durante horas contemplando a las estrellas y siendo cautivado por su belleza, y recibiendo picaduras de insectos cuyas marcas tardaban semanas en desaparecer. Pero lo que veo -esos silenciosos y titilantes puntos de luz- no es toda la belleza que hay. ¿Debería quedarme admirando cariñosamente una hoja solitaria e ignorar voluntariamente la presencia del bosque? ¿Debería satisfacerme mirando el sol brillando en un solo grano de arena y desdeñar cualquier conocimiento de la playa? Esos puntos brillantes en el cielo que llamamos planetas son mundos.

Allí hay mundos con una espesa atmósfera compuesta por dióxido de carbono y ácido sulfúrico, mundos de líquido incandescente con volcanes que podrían engullir la Tierra entera; mundos inertes con silenciosas marcas de cráteres; mundos con volcanes soplando penachos de polvo hacia el cielo sin aire; mundos con desiertos rosáceos y desolados; cada uno con una belleza extraña y ultra terrenal que se reduce a una simple mota de luz si solo observamos el cielo nocturno.

Los otros puntos brillantes que llamamos estrellas en vez de planetas son en realidad soles. Algunos son de una grandiosidad incomparable, cada uno brillando con la luz de mil soles como el nuestro, algunos de ellos no son más que brasas que liberan su energía mezquinamente. Algunos de ellos son cuerpos compactos tan masivos como nuestro Sol, pero con toda esa masa comprimida en una bola más pequeña que la Tierra. Algunos son más compactos todavía, con la masa del sol comprimida hasta el volumen de un pequeño asteroide. Y algunos son aún más compactos con su masa reducida hasta el volumen de cero, cuyo emplazamiento se caracteriza por un fuerte campo de gravedad que lo engulle todo y no devuelve nada; con materia cayendo en espiral por un pozo sin fondo y lanzando un salvaje grito de agonía de rayos X.

Existen estrellas que palpitan sin fin en una inmensa respiración cósmica y otras que, después de haber consumido su combustible, se expanden y enrojecen hasta engullir a sus propios planetas, si es que tiene alguno. Algún día, dentro de millones de años, nuestro Sol se expandirá y la Tierra se quemará y marchitará y se vaporizará convirtiéndose en un gas de hierro y roca sin dejar restos de la vida que una vez dio. Algunas estrellas explotan en un vasto cataclismo cuyo estallido feroz de rayos cósmicos, desplazándose apresuradamente casi a la velocidad de la luz, llega a través de miles de años a tocar la Tierra y suministrar parte de la fuerza motriz de la evolución a través de mutaciones.

A esta ínfima cantidad de estrellas que vemos al alzar la vista en absoluto silencio -unas 2.500, no más, incluso en las noches más oscuras y despejadas- se les suma una vasta horda que no vemos, que asciende a la enorme cantidad de trescientos mil millones, para formar un remolino enorme en el espacio. Este remolino, la Vía Láctea, se estira tan extensamente que le toma a la luz, moviéndose a 300.000 kilómetros por segundo, cien mil años para cruzar de un extremo al otro; y rota alrededor de su centro en un giro amplio y majestuoso que demora doscientos millones de años en completarse. El Sol, la Tierra y nosotros mismos, todos damos ese giro.

Más allá de la Vía Láctea existen otras galaxias, más o menos una veintena de ellas ligadas a la nuestra en un cúmulo de galaxias, la mayoría de ellas pequeñas, con no más de unos pocos miles de millones de estrellas en cada una; pero con una al menos, la galaxia Andrómeda, el doble de grande que la nuestra. Más allá de nuestro propio cúmulo, otras galaxias y otros cúmulos existen; algunos cúmulos formados por miles de galaxias. Se extienden hacia afuera y hacia el exterior tan lejos como nuestros mejores telescopios pueden ver, sin signos visibles de un final, tal vez cien mil millones de ellos en total.

Cada vez, en más y más de esas galaxias, estamos encontrando una intensa violencia en el centro; grandes explosiones y emanaciones de radiación señalando la muerte de quizás millones de estrellas. Incluso en el centro de nuestra galaxia existe una increíble violencia oculta en nuestro propio sistema solar y su periferia por enormes nubes de polvo y gas que yacen entre nosotros y el centro agitado. Algunos centros galácticos son tan brillantes que pueden ser divisados a distancias de miles de millones de años luz, distancias desde las cuales las galaxias mismas no pueden ser vistas, y solo los centros brillantes y voraces de energía se dejan ver, como quásares. Algunos de ellos han sido detectados desde más de diez millones de años luz de distancia.

Todas esas galaxias se alejan las unas de las otras en una inmensa expansión universal que comenzó hace quince mil millones de años, cuando toda la materia del Universo se encontraba en una pequeña esfera que explotó en la más vasta forma concebible para formar galaxias. El Universo podría expandirse eternamente o puede llegar el día en que la expansión disminuya y se invierta en una contracción para volver a formar la pequeña esfera y comenzar el juego de nuevo de manera que todo el Universo estaría exhalando e inhalando alientos que quizás tarden billones de años en completarse.

Todo ese panorama que se encuentra más allá del alcance de la imaginación humana fue posible gracias al trabajo de centenares de ***"letrados" astrónomos****.*

Todo eso, absolutamente todo fue descubierto después de la muerte de Whitman en 1892, y la mayoría en los últimos veinticinco años, de modo que el pobre poeta nunca supo cuán limitada e insignificante era la belleza que admiraba cuando él '**levantaba la vista en perfecto silencio hacia las estrellas**'.

Tampoco nosotros podemos conocer o imaginar ahora la belleza ilimitada que se nos revelará en el futuro gracias a la ciencia."

Hasta aquí la poesía de Isaac Asimov. Entenderéis que tras lo anterior no puedo añadir más. Gracias por vuestra compañía.

APÉNDICE II. Breve cronología y otros parámetros

Momento	Tiempo	Energía	Temperatura (K)	Tamaño observable (metros)
Edad de Planck	$5{,}391 \times 10^{-44}$ seg	10*28 eV	$1{,}417 \times 10^{32}$	$1{,}161 \times 10^{-35}$
Momento cero	10^{-43} seg	10^{19} GeV	$1{,}417 \times 10^{32}$	$1{,}161 \times 10^{-35}$
Aparece la gravedad	10^{-43} seg			
Bosones X e Y				
Época de la Gran Unificación				
Inicio de la inflación	10^{-35} seg	10^{15} GeV		
Separación interacción fuerte	10^{-32} seg			
Fin de la inflación	10^{-32} seg			10^{-1}
[Universo=Límite del LHC]	10-^{14} seg	10^{4} GeV		
Separación débil/ electromagnetimo	10^{-12} seg	10^{3} GeV	10^{16}	3×10^{-4}
Plasma quark-gluón	10^{-12} /10^{-6} seg			
Inicio de la transicion a hadrones	10*-6 seg	1 GeV	10^{13}	
	10*-4 seg	100MeV	10^{12}	3×10^{4}
Liberación de los neutrinos primordiales	1 seg	1 MeV	10^{10}	10^{16}
Relación protón/neutrón=3/1	1 seg			
Fin del equilibrio termodinámico e^-/e^+	14 seg	500 KeV	3×10^{9}	

Momento	Tiempo	Energía	Temperatura (K)	Tamaño observable (metros)
Relación protón/neutrón=5/1	14 seg			
Inicia la Nucleosíntesis	100 seg			
	200 seg	100 KeV	10^9	$3x10^{10}$
Fin de la Nucleosíntesis	240 seg			
La materia domina a la radiación	380.000 años			
Época de la Recombinación	380.000 años	0,25 eV	$3x10^3$	$3x10^{21}$
Primeras estrellas (Población III)	150?? millones años			
La vía Láctea empieza a formarse	200 millones años			
Época de la reionización (inicio-fin)	400-900 millones años			
Galaxia más antigua (GN-z11)	400 millones años			10^{23}
Cuásar más antiguo (ULAS J1120+0641)	770 millones años			$5x10^{23}$
Primeros protocúmulos de galaxias	1.000 millones años	10^{-3} eV	20	10^{25}
Primeros cúmulos de galaxias	3.000 millones años			
Primeros supercúmulos de galaxias	5.000 millones años			
La energía oscura domina a la gravedad	6.200 millones años			
Hoy	13.800 millones años	$2,3^{10-4}$	2,7	10^{26}

APÉNDICE II. Bibliografía

Más abajo resumo un listado de los principales libros de los que me he alimentado. Pero antes tengo que agradecer directamente a gente que tengo más próxima, sabios de la divulgación en la red, comenzando con Pedro Gómez- Esteban, alma mater del blog "*El Tamiz*" (y padre de nuestro blog "*El Cedazo*") en donde encontraréis series tan interesantes como "*El Sistema Solar*", "*Esas maravillosas partículas*", "*La vida privada de las estrellas*", "*Las cuatro fuerzas*", "*Relatividad sin fórmulas*" o "*Cuántica sin fórmulas*". También de "*El Cedazo*" agradezco a Antares por todo lo que he aprendido y disfrutado de su serie "*El Universo – La corta historia de la fascinación por algo tan grande*". Continúo con el blog "*Cuentos cuánticos*" de Enrique Fernández Borja; el blog "*Neofronteras*" del enigmático doctor en física J.J.; o dentro de la comunidad de blogeros "*Naukas*" a Daniel Marín, Francisco R. Villatoros, César Tomé López y algún otro que me dejo en el tintero; a la desaparecida -o en *standby*- "*Pizarra de Yuri*" de Antonio Cantó; al blog "*Of Particular Significance*" de Matt Strassler y… alguno más que no incluyo en la relación, pero que quedan en mi agradecimiento. Y como en las bodas de Caná, el vino bueno llega al final: gracias a mis editores por su ayuda en la redacción y por sus estimulantes sugerencias.[6] Y gracias a vosotros lectores por los comentarios que me habéis enviado: de verdad que me han enriquecido en grado superlativo.

Y ahora sí, la bibliografía. Son libros que he leído y me han enseñado mucho:

- Bill Bryson: Una breve historia de casi todo.
- Sean Carrol: El gran cuadro.
- Eric Chaisson y Steve McMillan: Astronomy today.
- Paul Davies: Los últimos tres minutos.

- Cristophe Galfard: El Universo en tu mano.
- George Gamow: La creación del Universo.
- Brian Green: El tejido del Cosmos.
- Brian Green: El Universo elegante.
- John Gribbin: Biografía del Universo.
- Shahen Hacyan: Los agujeros negros y la curvatura del espacio-tiempo.
- Stephen Hawking: Brevísima historia del tiempo.
- Stephen Hawking: El Universo en una cáscara de nuez.
- Catherine Heymans: The dark Universe.
- Jim Holt: ¿Por qué existe el mundo?
- Michio Kaku: Universos paralelos.
- Lawrence Krauss: A Universe from nothing.
- Lawrence Krauss: Historia de un átomo.
- Carl Sagan: Cosmos.
- George Smoot y Keay Davidson: Arrugas en el tiempo.
- Moles Villamate: Claroscuro del Universo.
- Steven Weinberg: Los tres primeros minutos del Universo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 30 Y APÉNDICES:

1. Imagen: (NASA, dominio público)
2. Las anteriores palabras se han extraído del libro de Carl Sagan, "*Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*". Carl Sagan es de sobra conocido para todo el que ama su Universo. Pero por si no es ese el caso… Fue un astrónomo, astrofísico, cosmólogo, escritor y divulgador científico estadounidense (1934-96). Defensor del pensamiento escéptico

científico y del método científico, pionero de la exobiología, promotor de la búsqueda de inteligencia extraterrestre entre otras cosas, ganó gran popularidad gracias a la galardonada serie documental de TV "*Cosmos: Un viaje personal*", producida en 1980, de la que fue narrador y coautor.

3. Para los curiosos, aquí os dejo un enlace a un somero artículo de Wikipedia que habla al respecto. Y un segundo más detallado para el caso del Big Freeze.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Destino_final_del_universo]

[https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Freeze]

4. Isaac Asimov fue un escritor y profesor de bioquímica en la facultad de medicina de la Universidad de Boston de origen ruso, nacionalizado estadounidense, conocido por ser un prolífico autor de obras de ciencia ficción, historia y divulgación científica.

5. Walt Whitman fue un poeta, enfermero voluntario, ensayista, periodista y humanista estadounidense. Su trabajo se inscribe en la transición entre el trascendentalismo y el realismo filosófico, incorporando ambos movimientos a su obra. Whitman está entre los más influyentes escritores del canon estadounidense y ha sido llamado el padre del verso libre. Dada la fecha de su muerte, 1.892, convendremos en su descargo que quizás en su verso no podía decir otra cosa distinta de la que dijo.

6. Me refiero a Pedro Gómez-Esteban, Javier J Sedano y, en grado máximo, a Macluskey ¡qué hubiera sido de mi sin Mac!